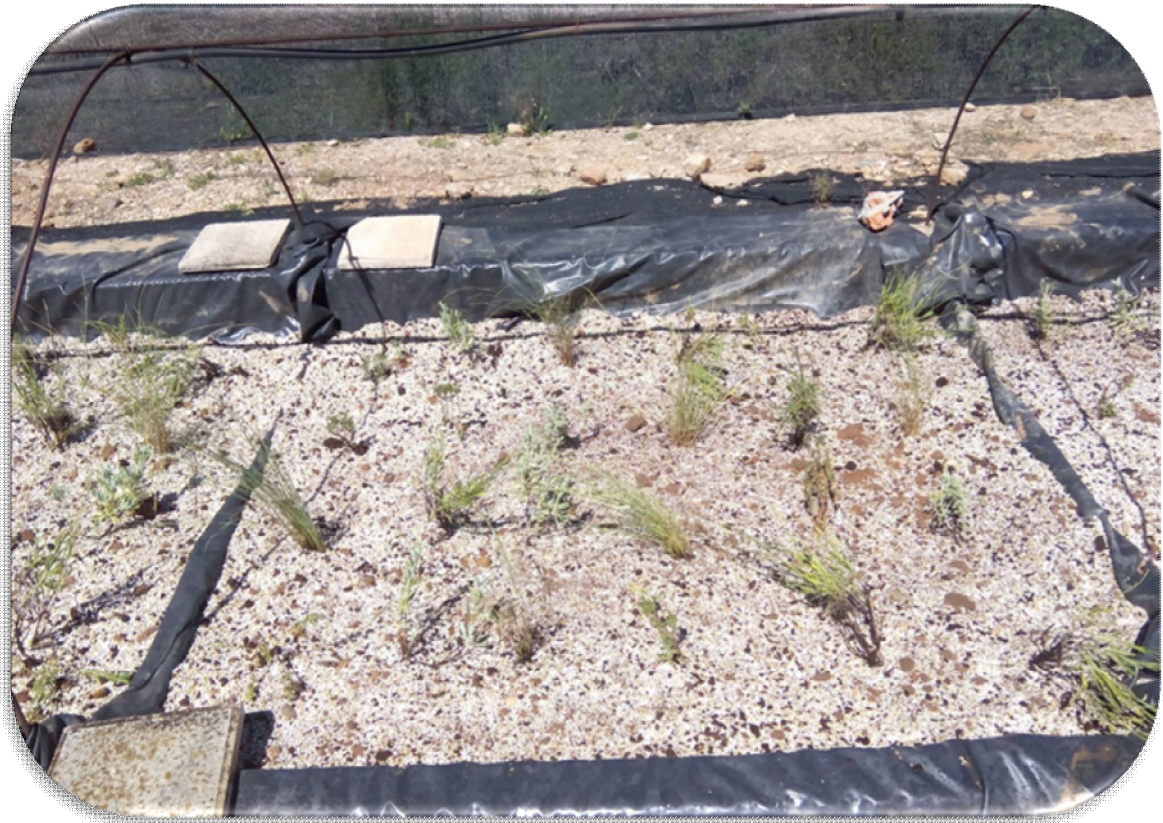


Establecimiento de un nivel de riego mínimo en verano para las cubiertas vegetales en ambientes mediterráneos continentales.



Autor: Javier Maldonado Campos

Director y Tutor académico: Dr. Pedro Villar Salvador

Alcalá de Henares, a 17 de septiembre de 2015

Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas



Universidad
de Alcalá



Universidad
Rey Juan Carlos

Resumen	- 1 -
Abstract	- 2 -
Introducción	- 2 -
Cubierta vegetal. Definición, tipos y estructura.	- 2 -
Historia de las cubiertas vegetales y situación de su uso en el mundo.....	- 4 -
Justificación. Beneficios de las cubiertas vegetales.....	- 5 -
♣ Beneficios a escala de ciudad:.....	- 6 -
♣ Beneficios a escala de edificios:.....	- 7 -
Justificación de la utilidad de las cubiertas vegetales en climas mediterráneos-	8 -
Objetivos e hipótesis	- 10 -
Material y métodos.....	- 11 -
Descripción y construcción de las parcelas.	- 11 -
Selección y plantación de especies.....	- 15 -
Riego estival	- 16 -
Mediciones de crecimiento y fisiología de las plantas y humedad del sustrato-	18 -
Análisis estadísticos.....	- 19 -
Resultados	- 20 -
Humedad del sustrato	- 20 -
Resultados fisiológicos	- 22 -
Supervivencia.....	- 25 -
Crecimiento	- 26 -
Discusión	- 28 -
Agradecimientos.....	- 33 -
Bibliografía.....	- 33 -
Anexos.....	- 40 -

Resumen

Las cubiertas vegetales, es decir, la implantación activa de vegetación en las azoteas y tejados de edificios, se están convirtiendo en una medida más para paliar los problemas ambientales de las grandes ciudades. En España, el uso de las cubiertas vegetales es muy pequeño en comparación con otros países de climas no mediterráneos. Todavía existen importantes lagunas de conocimiento acerca de los cuidados necesarios para mantener la funcionalidad de una cubierta vegetal en ambientes semiáridos a unos costes de mantenimientos razonables. Así mismo, hacen falta estudios sobre las especies que pueden desarrollarse con escaso mantenimiento en éstos sistemas. El objetivo de este estudio es establecer un nivel de riego mínimo durante el verano, en la época de mayor estrés hídrico, para el mantenimiento de la funcionalidad de una cubierta vegetal bajo condiciones mediterráneas continentales, minimizando los costes de riego. Además, se ha analizado la viabilidad de cuatro especies perennes para cubiertas verdes semi-intensivas mediterráneas. Para ello, se ha realizado un experimento de dos meses durante el verano de 2015 en el que se han establecido tres regímenes de riego: 2, 4 y 8 L m⁻² semana⁻¹. Las especies estudiadas han sido *Lavandula latifolia*, *Lygeum spartum*, *Vella pseudocytisus* y *Salvia lavandulifolia*. Periódicamente, se midió la humedad del sustrato y el estado fisiológico de las plantas mediante mediciones de fluorescencia. Al final del estudio, se cuantificó la supervivencia y se midió el crecimiento de las plantas. La humedad del sustrato disminuyó más en las parcelas con menor riego, lo cual incrementó la fotoinhibición de las plantas y, consecuentemente, redujo la supervivencia en relación con los riegos de 4 y 8 L m⁻² semana⁻¹. Las especies presentaron diferencias de supervivencia que dependieron del riego y de la posición de la parcela. En general, *L. spartum* presentó los valores más altos de supervivencia, mientras que *S. lavandulifolia* mostró la menor supervivencia pero el mayor crecimiento de todas las especies. La supervivencia y crecimiento fueron más altos en las partes bajas de las cubiertas vegetales que en la partes altas. Dicho patrón se relacionó positivamente con diferencias en la humedad del sustrato en ambas zonas de las cubiertas. Concluimos que el nivel de riego más adecuado para que las plantas mantengan una supervivencia adecuada y buen estado fisiológico en una cubierta vegetal bajo clima mediterráneo continental ha de ser al menos 8 L m⁻² semana⁻¹.

Palabras clave: Cubierta semi-intensiva, ecología urbana, fluorescencia, humedad edáfica, selección de especies, servicios ecosistémicos.

Abstract

Green roofs, the active establishment of vegetation on roofs, are becoming important tools to mitigate the large cities environmental problems. In Spain, green roofs have been little used in comparison with other non-Mediterranean countries. There are still important gaps regarding the knowledge about the maintenance management of green roofs in semiarid environments at reasonable costs. Moreover, studies are needed about the species that can grow with little maintenance on these systems. The aim of this study is to establish a minimum irrigation schedule during the summer, in the water stress season, to maintain the functionality of green roofs under continental Mediterranean conditions, minimizing irrigation costs. In addition, the feasibility of four perennials species has been compared for Mediterranean semi-intensive green roofs. To achieve this objective, we performed a study for two summer months in 2015, in which three irrigation regimes have been established: 2, 4 and 8 L m⁻² week⁻¹). Studied species were *Lavandula latifolia*, *Lygeum spartum*, *Vella pseudocytisus* and *Salvia lavandulifolia*. Periodically, we measured the soil moisture and the plants physiological status using chlorophyll fluorescence measurements. At the end of the study, survival and growth was measured. Moisture decreased more in the plots with the lowest irrigation, which plants showed the highest photoinhibition and, consequently the lowest survival. Species differed in survival which depended on irrigation level and the position within the green roof. Overall, *L. spartum* had the highest survival, while *S. lavandulifolia* had the lowest survival but the highest growth of all species. Plant survival and growth were higher in the lower positions of the green roofs than in upper sides. This pattern was related to differences in soil moisture in both parts of the green roof. Therefore we conclude that the most appropriate irrigation for an optimal survival and for plants to develop a good physiological condition must be over 8 L m⁻² week⁻¹.

Keywords: Ecosystem service, fluorescence, soil moisture, semi-intensive green roof, species selection, urban ecology.

Introducción

Cubierta vegetal. Definición, tipos y estructura.

Según la EPA (United States Environmental Protection Agency), una cubierta vegetal es: “una capa de vegetación que crece en las azoteas” (<http://www.epa.gov/>); múltiples autores como Werthmann (2008) o Berretta *et al.*

(2014) también definen a las cubiertas vegetales como una capa de sustrato (de espesor variable) localizada en las azoteas de los edificios, capaz de soportar el crecimiento de plantas. Las cubiertas vegetales se han clasificado en diferentes categorías según la profundidad de sustrato y, en consecuencia, los tipos de plantas que puede sustentar (<http://www.epa.gov/>; Palla *et al.*, 2010; Minke, 2004; Recomendaciones Técnicas para Proyectos de Cubiertas Vegetales, <http://cubiertasvegetales.cdt.cl>; FLL, 2002):

- *Cubiertas extensivas*. Son las de menor espesor (normalmente hasta 15 cm), normalmente no son transitables y tienen una capacidad menor de retención de agua. En ellas se suelen plantar: herbáceas de formas de crecimiento variada y plantas crasas como *Sedum* spp (Figura 1).
- *Cubiertas intensivas*. El espesor del sustrato es siempre mayor de 15 cm, suelen ser transitables y tienen la mayor capacidad de retención de agua. En ellas se suelen plantar: arbustos y árboles pequeños.
- *Cubiertas semi-intensivas*. Son cubiertas intermedias entre las extensivas y las intensivas. La profundidad del sustrato es intermedia entre ambas cubiertas (entre 10 y 20 cm) y el tipo de planta usada dependerá del espesor de sustrato.

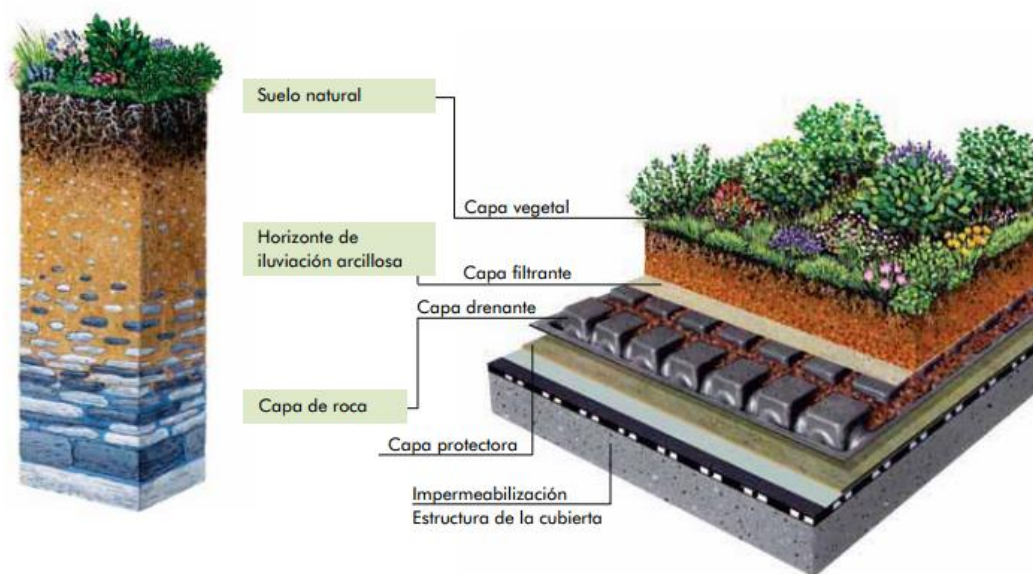


Figura 1. Estructura de capas característica de los Sistemas de Cubiertas Verdes ZinCo (<http://www.zinco-cubiertas-ecologicas.es/index.php>).

Todas las cubiertas vegetales tienen una serie de capas que pueden variar en su disposición. En general, desde la más profunda a la más superficial, dichas capas (Figura 1) son (Recomendaciones Técnicas para Proyectos de Cubiertas Vegetales, <http://cubiertasvegetales.cdt.cl>; FLL, 2002, Minke, 2004):

1. Estructura soporte. Es la superficie que soporta toda la estructura, a efectos prácticos, supone el suelo de la azotea.
2. Capa de impermeabilización. Responsable de evitar que no pase humedad al interior de la vivienda. Es la capa más profunda y, por lo tanto, es la más complicada de acceder en caso de tener que repararse.
3. Protección anti-raíz. Con la instalación de esta capa, se intenta prevenir que las raíces de las plantas traspasen la capa de impermeabilización.
4. Drenaje. Tiene como principal objetivo el almacenamiento de agua, así como de dirigir el agua excedente hacia los puntos de desagüe (puntos de drenaje).
5. Filtro. Evita que las partículas finas del sustrato colapsen el sistema de drenaje.
6. Medio de crecimiento o sustrato. Podemos definir a esta capa como la combinación de materiales orgánicos e inorgánicos que proporciona un medio adecuado para el enraizamiento y crecimiento de la vegetación. También, tiene una importante capacidad de retención de agua.
7. Capa vegetal (plantas). Esta capa es en la que proporciona la mayor parte de las características a la cubierta vegetal y es el principal componente vivo de la misma.

Historia de las cubiertas vegetales y situación de su uso en el mundo.

El ser humano ha construido cubiertas vegetales a lo largo de su historia por motivos y en climas muy diferentes (Magill *et al.* 2011), estando presentes tanto en civilizaciones que habitaban en climas fríos y lluviosos, como en climas secos y cálidos.

Un ejemplo claro es el que encontramos en muchos países escandinavos, que utilizaban tepes de césped para la fabricación de sus tejados (Stater, 2008). Se sirvieron de ellas para aislar sus viviendas del frío y la lluvia (van Hoof & van Dijken, 2008). Esta arquitectura se conoce bien porque ha llegado hasta nuestros días y era tan común que incluso las iglesias medievales fueron construidas a base de turba y rocas, sobre todo por la falta de madera (Kristjansdottir *et al.*, 2001).

También se han construido cubiertas vegetales para mitigar el calor. Un ejemplo fueron los zigurats del Imperio Mesopotámico en los que se plantaban árboles y arbustos para atemperar los cálidos veranos. (Magill *et al.* 2011). Los romanos, también mostraron interés por esta técnica e instalaron árboles y arbustos en numerosos edificios como en el castillo de Sant'Angelo. Dicha técnica se siguió usando en el tiempo, como se puede ver en Genoa (Magill *et al.* 2011) o en la Torre Guinigi en la ciudad de Lucca que data del siglo XIV. Estas estructuras también se han desarrollado en Tanzania, con el fin de protegerse del calor del verano (Minke, 2004; Withmann, 2008).

En tiempos modernos, podemos destacar las construcciones en Alemania, en donde existe una larga tradición de cubiertas vegetales siendo el único país en el que existe una normativa vigente sobre cubiertas vegetales (FLL, 2002). En Alemania se instalan 13 km² de cubiertas vegetales al año (Werthmann, 2008). Una de las primeras cubiertas vegetales fue desarrollada en 1839 por un fabricante de barriles (Köhler & Poll, 2010), pero no fue hasta los años 60 del siglo XX cuando se desarrolló la tecnología moderna de las cubiertas vegetales y su uso más generalizado en la construcción de viviendas (Stater, 2008; Withmann, 2008; Magil *et al.*, 2011). Actualmente, también podemos encontrar importantes desarrollos de cubiertas vegetales en otros países europeos como Dinamarca, Noruega, o Francia.

En España, al igual que en todos los países de la Cuenca Mediterránea, las cubiertas vegetales son poco frecuentes (Benvenuti & Bacci, 2010) en comparación con otros países como Alemania, Suiza o Dinamarca. No obstante, existe un incipiente interés por las cubiertas vegetales en España. Algunos ejemplos interesantes son el la terminal T4 en el aeropuerto de Barajas, con un área de 54.000 m² (IGRA, 2007), la Expo de Zaragoza, en donde existe una cubierta de 70.000 m² (Fernández-Cañero *et al.*, 2013), la cubierta vegetal del edificio del Banco de Santander en Boadilla del Monte (IGRA, 2006) o la del BBVA (<http://blog.ciudadbbva.es/fotos/89/>).

En lo que respecta a Estados Unidos y Canadá, se han construido cubiertas vegetales para proteger a las viviendas de la insolación (Withmann, 2008), si bien la expansión de las cubiertas vegetales no ha sucedido hasta la última década (Dvorak & Volder. 2010). En Chicago se han construido 280.000 m² de cubiertas vegetales (Werthmann, 2008). En Asia, se puede destacar los esfuerzos que se han realizado en Japón (Liu & Baskaran 2003).

Justificación. Beneficios de las cubiertas vegetales.

El reciente aumento en el uso de las cubiertas vegetales, se ha propiciado por el desarrollo de la tecnología constructiva y de materiales y de la mayor concienciación por los problemas ambientales ligado al desarrollo de las ciudades. Según la ONU, actualmente el 53% de la población vive en ciudades y las previsiones auguran que dentro de dos décadas el 66% de la población mundial habitará en núcleos urbanos (Naciones Unidas, 2014). Debido al rápido proceso de urbanización, los ecosistemas están siendo remplazados por zonas urbanas y periurbanas (Fernández-Cañero *et al.*, 2013). Esto conlleva la aparición de problemas asociados, como el efecto de isla de calor o la gestión de aguas de lluvias y para los cuales las cubiertas vegetales pueden ser buenos instrumentos para paliarlos.

Muchos de los beneficios de las cubiertas vegetales están empíricamente demostrados (Nagase *et al.* 2013) y están relacionados con la mejora de servicios ambientales y con el ahorro energético de los edificios (Recomendaciones Técnicas

para Proyectos de Cubiertas Vegetales, <http://cubiertasvegetales.cdt.cl>). A continuación, vamos a desglosar ambos beneficios, con especial hincapié en los beneficios públicos relacionados con la mejora de servicios ecosistémicos.

♣ Beneficios a escala de ciudad:

Reducción de la isla de calor. El fenómeno conocido como “isla de calor” es típico de las ciudades grandes por el cual el interior de las ciudades tiene una temperatura superior a las zonas rurales o naturales situadas alrededor de las ciudades (Johnston & Newton, 2004). Según Taha (2015), la “isla de calor” se produce por varios factores y puede ocurrir a diferentes escalas. Los factores que la condicionan son múltiples como por ejemplo: el albedo de los elementos urbanos, la evapotranspiración a través de las plantas (Taha, 1997), la morfología de los edificios (Masseti *et al.*, 2014), entre otros. Otro factor importante que influye en la intensidad de la “isla de calor” es la localización geográfica, siendo en las latitudes bajas y medias en donde mayores problemas ocasiona (Taha, 2015).

Existen numerosos estudios que demuestran que las cubiertas vegetales pueden mitigar la “isla de calor” (Snodgrass & McIntyre, 2010; Fernández-Cañero *et al.*, 2013). La reducción de la temperatura de la azotea, así como del aire circundante, se debe a que las plantas proporcionan sombra y eliminan el calor del aire a través de la evapotranspiración y reflejan la radiación (Liu & Baskaran 2003; Yang *et al.* 2008). La evaporación de un litro de agua, conlleva la disipación de casi 2.2 MJ (530 Kcal) de energía (Minke, 2004), por lo que las plantas pueden reducir temperatura del aire.

Mejora de la calidad del aire. El aire de las ciudades suele tener altos niveles de contaminantes especialmente en ciudades que poseen un gran efecto de la isla de calor (Taha, 2015) que provocan numerosas enfermedades respiratorias (Yang *et al.* 2008). Las cubiertas vegetales pueden mejorar la calidad del aire (Fernández-Cañero *et al.*, 2013) entre otras razones porque actúan como sumideros de nitrógeno, plomo y zinc (Li & Yeung, 2014).

Gregoire & Clausen (2011) demostraron que el 65% del zinc presente en la precipitación, queda retenido en la cubierta vegetal. La reducción de la temperatura del aire por las cubiertas vegetales puede mitigar la contaminación atmosférica ya que reduce las reacciones fotoquímicas y, por tanto, la aparición de contaminantes secundarios, como el ozono (Akbari, 2002).

Mejora de la gestión de aguas lluvia. Las cubiertas vegetales mejoran la gestión de la escorrentía del agua de lluvia mediante dos vías:

Por un lado retienen las aguas de lluvia (Li & Yeung, 2014; Werthmann, 2008). Una cubierta típica de un edificio (sin vegetación o cubierta gris), libera entre el 80-100% del agua caída en los eventos de lluvias, mientras que una cubierta vegetal retiene entre el 40-70% del agua de lluvia (Werthmann, 2008). La cantidad

de agua retenida depende del grosor de la cubierta vegetal (Li & Yeung, 2014) y del área cubierta por las plantas (Banting *et al.*, 2005).

Por otro lado, las cubiertas vegetales reducen los picos máximos de descarga de agua en los fenómenos de lluvias, especialmente los torrenciales, llegando a reducir el pico en un 95% (Palla *et al.*, 2008). En eventos de lluvias torrenciales, la liberación del agua por parte de las cubiertas vegetales se produce horas después de la aparición de dicho pico de lluvia (Werthmann, 2008), lo cual es interesante puesto que se pueden reducir las inundaciones del sistema de alcantarillado y el desbordamiento de las depuradoras.

Aumento local de biodiversidad. Por último, se ha demostrado que las cubiertas vegetales, mejoran la biodiversidad (Francis & Lorimer, 2011; Fernández-Cañero *et al.*, 2013) ya que proveen unas buenas condiciones para que la colonicen diferentes especies de animales (Brenneisen, 2005; Francis & Lorimer, 2011) como, arañas, abejorros, (Brenneisen, 2005) pájaros (Fernández-Cañero & González-Redondo, 2006). Según Li & Yeung (2014), una de las principales causas del aumento de biodiversidad es la formación de sustrato. La biodiversidad se ve aumentada, también, porque las cubiertas vegetales suponen parches de hábitat (“stepping stones”) que pueden servir para conectar hábitats fragmentados (Kim, 2004). También este aumento de la biodiversidad se produce porque las cubiertas vegetales son capaces de proporcionar recursos durante todo el año. Sobre todo si la cubierta está hecha con una variedad amplia de plantas.

El aumento de la biodiversidad también se ve favorecido por el hecho de que cada vez se construyen más cubiertas vegetales que incorporan multitud de plantas en el mismo espacio lo que potencialmente puede mejorar los servicios ecosistémicos generados por las cubiertas vegetales (Cook-Patton & Bauerle, 2012).

Pese a que puede suponer un aumento de biodiversidad dentro de los núcleos urbanos, jamás puede compararse a la capacidad funcional de los medios naturales ni debe ser una justificación para eliminar los hábitats naturales (Li & Yeung, 2014).

♣ Beneficios a escala de edificios:

Mayor eficiencia energética del edificio. La investigación realizada por el National Research Council de Canadá (2003) demuestra que una cubierta vegetal reduce la transmisión de calor al interior del edificio en un 95% durante el verano; en invierno, la reducción en la transmisión de calor al exterior es del 24% (Recomendaciones Técnicas para Proyectos de Cubiertas Vegetales, <http://cubiertasvegetales.cdt.cl>). Olivieri *et al.* (2013) observaron que la ganancia neta de calor en una cubierta que presente una densa vegetación, es un 60% menor que un edificio sin cubierta vegetal. En investigaciones realizadas en los Estados

Unidos, se comprueba que las cubiertas vegetales reducen el pico de temperatura de 0.5 a 3.5 °C (Santamouris, 2012).

En resumen, el uso de cubiertas vegetales reduce el costo energético utilizado para la climatización de los edificios (Castleton *et al.* 2010).

Incremento de la durabilidad de la base de soporte. El sistema de cubiertas vegetales, protege a la membrana de impermeabilización, evitando que los rayos ultravioleta incidan directamente sobre ella. Todo esto hace que se aumente la vida útil de las bases soporte de 30 a 60 años (Stater, 2008).

Reducción de ruidos. El sustrato y las plantas reducen el ruido mediante la absorción (transformando la energía sonora en energía de movimiento y calórica), reflexión y dispersión (Minke, 2004). Recientes estudios han demostrado que un techo extensivo puede reducir 40 dB, mientras que una cubierta intensiva puede reducir hasta un 50 dB (Recomendaciones Técnicas para Proyectos de Cubiertas Vegetales).

A parte de los beneficios mencionados, existen otros relacionados con los beneficios estéticos y psicológicos, la reducción del remolino de polvo (Minke, 2004), etc. Otros beneficios pueden ser consultados en Minke, (2004), Li & Yeung (2014) o www.greenroofs.org; www.greenrooftechnology.com/, entre otros.

Justificación de la utilidad de las cubiertas vegetales en climas mediterráneos.

La mejora del capital natural de las ciudades está creciendo en importancia debido a la actuación de los múltiples agentes de los que dependen (autoridades locales, arquitectos, etc.) (White & Gatersleben, 2011). La “naturalización” urbana puede mejorar la percepción de la propia ciudad, la salud y calidad de vida de los ciudadanos, etc. tanto dentro de las ciudades, como fuera de ellas, gracias a la recuperación de servicios ecosistémicos perdidos (Cook-Patton & Bauerle, 2012).

La selección de especies para cubiertas vegetales es a menudo controvertida y dependerá del uso que se dé a la cubierta vegetal (Li & Yeung, 2014). Hay una amplia variedad de plantas en las cubiertas vegetales, existen cubiertas únicamente de *Sedum* spp., de plantas herbáceas típicas de pastizal, con arbustos y árboles e, incluso, con plantas hortícolas con un uso alimentario. Minke (2004), recomienda seleccionar especies según diferentes aspectos: espesor de sustrato, inclinación del techo, etc. (para más información, acudir al manual de “Techos verdes. Planificación, ejecución, consejos prácticos” (Minke, 2004) o al manual constructivo realizado por instituciones alemanas, FLL: Forschungsgesellschaft Landsentwicklung Landschaftsbau e.V.).

A diferencia de otros climas, la selección de especies para cubiertas verdes bajo condiciones del clima Mediterráneo es un reto nada sencillo. El principal

problema del clima mediterráneo es que los veranos son secos y cálidos. En algunas zonas, además, los inviernos son muy fríos. Esta falta de lluvia en la época más cálida junto con el uso de suelos de limitado espesor, hace que sea de vital importancia encontrar especies que puedan soportar déficits hídricos tan importantes. La utilización de plantas nativas puede ser una buena opción para resistir las exigentes condiciones climáticas de un país con un clima semi-árido y cálido ya que es razonable pensar que están adaptadas a la fuerte estacionalidad en la disponibilidad de recursos (Sala & Tenhunen, 1996).

Debido a las características particulares de las cubiertas vegetales, sobre todo en el ambiente mediterráneo, en donde la disponibilidad de agua es limitada en la época estival debido a las escasas precipitaciones, las plantas que se necesitan tienen que tener una reducida capacidad de transpiración. Por ello una opción interesante es emplear especies de talla pequeña como herbáceas perennes o caméfitos y subarbustos con hojas pequeñas.

Sedum es la especie que más se utiliza para las plantaciones de cubiertas extensivas de zonas secas debido a su elevada resistencia a la falta de agua (Van Woert *et al.*, 2005). Son plantas de metabolismo CAM, que les confiere una elevada eficiencia en el uso del agua y una baja tasa de transpiración (Ting, 1985). Actualmente, el reto consiste en aumentar el espectro de plantas que se puedan utilizar en lugares con climas semi-áridos.

El sustrato que se puede emplear en las cubiertas vegetales varía enormemente en composición y es el que determina muchos factores, (Johnston & Newton, 2004) como el grado de humectación, densidad, etc. En lo que respecta al grosor del sustrato, el de los intensivos el grosor será mayor que en los extensivos. El incremento de la profundidad protege a las plantas de temperaturas extremas pero, también, incrementa la reserva hídrica disponible para las plantas (Dunnett & Kingsbury, 2010). Pese a lo que se ha avanzado en el desarrollo de las cubiertas verdes, todavía hay aspectos, como las mezclas de sustratos, que son claves para el funcionamiento de las cubiertas vegetales en climas secos que han recibido poca atención (Young *et al.*, 2014).

Como hemos hablado con anterioridad, puesto que el clima mediterráneo impone severas limitaciones de agua y los suelos usados en las cubiertas vegetales no pueden tener gran espesor para almacenar agua, es importante que los materiales con los que se elabora el sustrato, deben tener una gran capacidad de retención de agua (FLL, 2002). Esto es importante, tanto para aumentar la retención del agua del sistema, la transpiración de las plantas, y garantizar una elevada supervivencia en los periodos secos (Graceson *et al.*, 2014). Así como tenemos que tener un sustrato de más de 20 cm (Benvenuti & Bacci, 2010), para que las plantas de la cubierta vegetal tengan agua suficiente para su supervivencia. En el trabajo de González del Pino (2014), también se demuestra la influencia del sustrato en el crecimiento y supervivencia de las plantas, en él se especifica que

sustratos de más de 20 cm son los óptimos para sustentar plantas en un estado óptimo.

Para asegurar el funcionamiento de una cubierta vegetal en climas secos y cálidos, además de seleccionar bien las especies y usar un sustrato adecuado se puede recurrir al riego en periodos puntuales para mitigar el estrés hídrico intenso. En climas Mediterráneos, el riego se restringiría a los meses estivales y debería dirigirse a mantener una humedad mínima en el sustrato con el fin de evitar el deterioro fisiológico y la muerte de las plantas (Montero *et al.* 2013). En ningún caso, el riego debería promover el crecimiento intenso de las plantas en verano, proceso que debe ocurrir el resto del año cuando las condiciones de humedad naturales son mayores. Por ello, uno de los retos del diseño de cubiertas vegetales en ambientes mediterráneas es decidir el nivel mínimo de riego necesario. Las necesidades de riego en cubiertas vegetales han sido poco estudiadas porque el desarrollo de las cubiertas vegetales ha sido mayor en países con alta pluviometría donde el agua no es un factor limitante.

La variedad de tratamientos con respecto al riego es muy grande y los diferentes autores optan por estrategias distintas (en función de sus propios objetivos). Montero *et al.* (2014), realizó un experimento en la ciudad de Almería en donde suministró $9,4 \text{ L m}^{-2} \text{ semana}^{-1}$ en donde se regaba dos veces por semana. Zhang *et al.* (2014) realizó un experimento en el que se regó, hasta saturar el sustrato, tres veces en los diez días siguientes a su establecimiento para, a continuación, regar cada día durante los siguientes diez días este riego se mantuvo durante mes y medio hasta que se dejó de regar. Raimondo *et al.* (2015) diseñó un experimento en la universidad de Messina (Italia) en donde se calculó el punto de saturación máximo del sustrato y se suministró el 100% de la capacidad en un tratamiento y el 75% de la capacidad de saturación en el otro. Por último, Paraskevopoulou *et al.* (2015) calcularon la cantidad de agua a suministrar en el sistema a partir de la evapotranspiración diaria que determinaron a partir de un coeficiente (exportado de la FAO) y el coeficiente propio del cultivo y, una vez obtenidos estos datos, realizaron dos tratamientos, uno con el 30% y otro con el 15% del agua perdida por evapotranspiración.

Objetivos e hipótesis

Este estudio, pretende seguir aportar conocimiento sobre el riego de las cubiertas vegetales, con el fin de optimizar el coste de su mantenimiento, factor que es importante en los ecosistemas mediterráneos. En concreto, se analiza:

- 1) El riego mínimo que debe aportarse durante el período estival para garantizar la supervivencia de las plantas sin estimular el crecimiento.
- 2) Comparar la viabilidad de cuatro especies de plantas perennes de bajo porte para su uso en cubiertas verdes en climas Mediterráneos

continentales. Las especies seleccionadas son *Lavandula latifolia*, *Salvia lavandulifolia*, *Lygeum spartum* y *Vella pseudocytisus*

- 3) Comparar el efecto que tiene la posición en una Cubierta vegetal en pendiente (Parte alta vs. Parte baja) en la humedad del sustrato y el desarrollo de las plantas. Este objetivo pretende establecer si las necesidades de riego y las especies implantadas deben diferir entre posiciones de una cubierta vegetal inclinada.

Nuestra hipótesis es que un incremento del riego aumenta la supervivencia de las especies y que en cubiertas verdes con una pendiente moderada, las necesidades de riego serán mayores en las partes altas que en las partes bajas de las parcelas.

Material y métodos

El estudio se ha desarrollado en las instalaciones del Real Jardín Botánico Juan Carlos I de la Universidad de Alcalá (latitud: 40° 30' 14.585" N; longitud: 3° 20' 26.037" O, con una altitud aproximada de 600 m.s.n.m.). La duración del estudio fue desde el 07/julio/2015 al 02/septiembre/2015.

Descripción y construcción de las parcelas.

El experimento se ha realizado en dos parterres del Jardín Botánico. En estos parterres, se construyeron nueve parcelas, cada una de 2 m de longitud y 1,8 m de anchura y una profundidad de sustrato de 0,25 m, resultando para cada parcela una superficie de 3,6 m² y 0,9 m³ de volumen.



Figura 2. Pendiente final de los parterres, después de perfilado.

Como se puede observar en la Figura 2, lo primero que se hizo fue crear una pendiente en los parterres; para ello, se siguieron las recomendaciones técnicas que aparecen en el manual de Minke (2004) que recomienda una pendiente no superior a 5° para cubiertas vegetales localizadas en techos planos. En nuestro caso, la pendiente es de 3° , por lo tanto, la diferencia de altura entre la parte superior y la parte inferior fue de 10 cm. Para conseguir dicha pendiente, se utilizó una retroexcavadora, mientras que con un rastrillo se homogeneizó el perfil y se suavizaron las ondulaciones generadas por la retroexcavadora.

A continuación, se delimitaron las nueve parcelas. Para ello, se utilizaron frisos de madera que, una vez unidos entre sí mediante cinta de embalar, medían 30 cm. de alto (Figura 3, imagen izquierda). Una vez que se colocaron los tablonos, se instaló una lámina impermeable de PVC de 0,5 cm de espesor.



Figura 3. Compartimentalización de cada parcela mediante tablones (izquierda). Resultado final (individualizado) de cada parcela con la lámina impermeable (derecha).

La capa impermeable es una lámina continua, sin fisuras ni puntos de unión, de tal modo que la impermeabilización está completamente asegurada mientras las propiedades de dicha lámina se mantengan intactas. La lámina impermeable se extendió a lo largo de los parterres, y por encima de los tablones de separación de las parcelas, evitando dejar arrugas que pudieran dificultar el drenaje (Figura 3, imagen derecha).

El sistema de drenaje es fundamental para la evacuación del agua excedente del sistema de la cubierta vegetal. Para la realización de la capa de drenaje, se hicieron dos actuaciones:

- 1.- Creación de la pendiente. Este paso, ha sido explicado con anterioridad.
- 2.- Creación de los agujeros de drenaje. Los agujeros de drenaje son importantes para que el agua que no se ha quedado retenida en el sustrato pueda ser evacuada por la gravedad. Para decidir la posición de los agujeros de drenaje, se procedió a verter agua desde la parte más elevada de la cubierta y observar hacia donde caía y quedaba retenida. En estos puntos, se perforó la lámina impermeable por medio de un cúter.

Para evitar el colapso del agujero de drenaje y evitar que las raíces pudieran penetrarlo, se instaló una malla de mosquitera plegada a modo de filtro. Además, antes de colocar el sustrato, se dispuso encima de los agujeros de drenaje, una lámina geotextil para evitar que el sustrato alcance la malla y la tapone (Figura 4).



Figura 4. Resultado final del agujero de drenaje con la redecilla.

A continuación se vertió el sustrato que consistió en una variación del sustrato que propone Ntoulas *et al.* (2012), el volumen total de sustrato utilizado en el experimento fue de 7,5 m³. Los componentes de la mezcla y su porcentaje han sido las siguientes:

- ✓ 40% de vermiculita (granulometría de 1-4 mm, densidad 60-90kg/m³, PROJAR, España).
- ✓ 25% de perlita (granulometría 1-4 mm, densidad 85-110 kg/m³, A-13 PROJAR, España).
- ✓ 20% de turba de *Sphagnum* rubia fertilizada 0,6 g/L (White C1, Kekkilä, Finlandia).
- ✓ 15% de suelo arcilloso extraído del Jardín Botánico Juan Carlos I.

Para garantizar una mezcla homogénea de dichos componentes se utilizó una hormigonera (Figura 5). Una vez realizada la mezcla en las proporciones descritas, se extendió el contenido de la hormigonera en las parcelas hasta que se consiguió la altura de sustrato requerida (aprox. 0,23 m). Cada parcela se rellenó con el contenido de cuatro hormigoneras. En la última tanda de sustrato vertida en cada parcela, se añadió 1 L de un fertilizante NPK estándar de liberación lenta (NUTRICOTE 18-06-8 (N-P-K) de 8-9 meses de liberación, Projar, España).



Figura 5. Rellenado de las piscinas con el sustrato.

Selección y plantación de especies.

Los criterios que se han seguido para seleccionar las especies de plantas del experimento, han sido:

1. Plantas de un bajo requerimiento hídrico.
2. Plantas que viven en suelos degradados y que, por tanto, se presupone que son capaces de desarrollarse con escaso sustrato resistir bien condiciones de estrés hídrico.
3. Plantas nativas de zonas mediterráneas continentales del centro de la Península Ibérica.
4. Disponibilidad en vivero.

Se han seleccionado cuatro especies: *Lavandula latifolia*, *Salvia lavandulifolia*, *Lygeum spartum* y *Vella pseudocytisus*. Se han usado plantones de 1 o 2 savias cultivados en vivero en contenedor; en concreto proceden de Viveros Alborada (todas las especies salvo *S. lavandulifolia*) y del vivero del Centro Nacional de Recursos Genéticos Forestales “El Serranillo”. Las plantas fueron cultivadas en contenedores de 200-250 mL usándose como sustrato una mezcla de turba. La

plantación se realizó el 27 de mayo de 2015 y en cada parcela se plantaron 24 plantas (seis por especie, 216 plantas en el conjunto de las nueve parcelas del experimento). Algunas de las características más importantes que nos han llevado a escoger estas plantas están incluidas en el Anexo I. En el Anexo II se puede ver las fases por las que se ha pasado hasta la instalación final de la cubierta vegetal. Las plantas se introdujeron de forma aleatoria, en la disposición que se representa en la Figura 5.

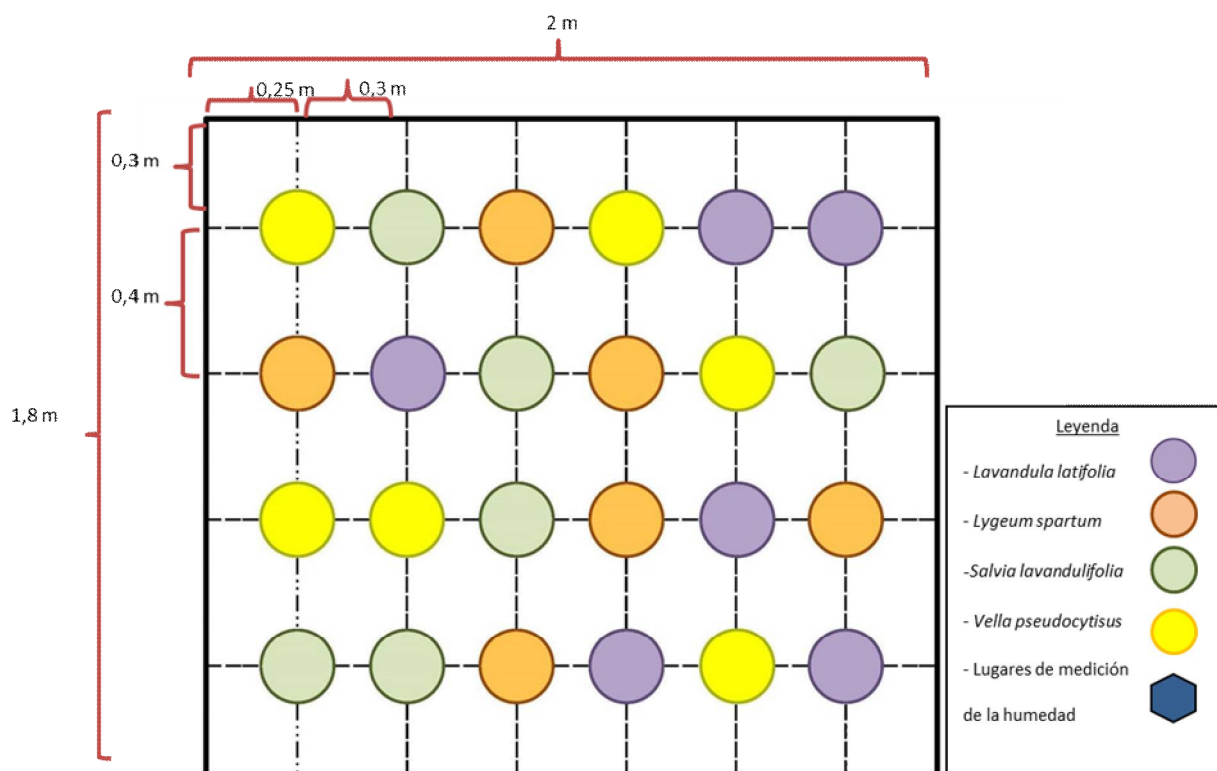


Figura 5. Diseño espacial del marco de plantación y lugares donde se midió la humedad del sustrato.

Riego estival

Puesto que el experimento trata del establecimiento de un riego óptimo para que las plantas tengan un desarrollo adecuado en verano, se ensayaron tres niveles de riego:

- 2 L m⁻² semana⁻¹.
- 4 L m⁻² semana⁻¹.
- 8 L m⁻² semana⁻¹.

El tratamiento de 2 L m⁻² semana⁻¹ corresponde con la media de precipitación de los meses de verano en Alcalá de Henares, mientras que el tratamiento de mayor riego se ha determinado calculando la precipitación media semanal dividiendo la precipitación anual (450 mm al año, Gómez Sal, 2005) entre

54 semanas. El tratamiento de $4 \text{ L m}^{-2} \text{ semana}^{-1}$, consiste en una cantidad intermedia entre el tratamiento más restrictivo y el más generoso. La administración del riego fue semanal y se realizó mediante difusores insertados sobre un tubo de riego situado encima de los parterres (Figura 6). La aplicación de los tratamientos de riego se realizó desde la primera semana de julio hasta la primera semana de septiembre de 2015. Hasta que comenzó la aplicación de estos tratamientos, el riego fue el mismo para todas las parcelas y se realizó diariamente para garantizar una completa hidratación del sustrato y el establecimiento de las plantas después de la plantación.

Las parcelas se adjudicaron aleatoriamente a cada tratamiento de riego. Para evitar que el riego de una parcela afectara las colindantes, las parcelas se independizaron con planchas de poliespán de 20 mm de espesor, recortadas para adecuarse a la estructura sobre la que colocaron los difusores (Figura 6).



Figura 6. Independización del riego de cada parcela.

Para saber cuánta agua había que aportar a cada parcela en cada evento de riego, se ha calculado el riego necesario; para ello se colocaron dos recipientes por parcela de superficie conocida y se abrió el riego durante 5 minutos. Transcurrido ese tiempo se pesó, en una balanza, el agua contenida dentro de los recipientes. Con estos datos, se calcularon los litros necesarios por minuto (Tabla 1) y se calculó

el tiempo necesario que tarda en alcanzar la cantidad necesaria de agua para cada tratamiento.

Tabla 1. Cantidad de riego suministrado por parcela (en L m⁻² semana⁻¹) y tiempo empleado para suministrar dicha cantidad de riego.

Parcela	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cantidad riego (L/min)	0,176	0,245	0,125	0,479	0,174	0,286	0,180	0,286	0,190
Cantidad de agua a suministrar (L/m ² y semana)	2	4	2	8	2	8	4	8	4
Tiempo (minutos)	11'40"	16'30"	16'	16'40"	11'50"	28"	22'25"	28'	21'

Mediciones de crecimiento y fisiología de las plantas y humedad del sustrato.

♣ Para la consecución de los objetivos del experimento, se tomaron mediciones de supervivencia, crecimiento y fisiológicas en las plantas: Las medidas de crecimiento se tomaron al principio (07/julio/2015) y final del experimento (02/septiembre/2015). De cada planta se midió la altura, longitud y la anchura de la parte aérea de la planta con una regla y se calculó el volumen de la copa, asumiendo que la parte aérea de *Vella pseudocytisus*, *Lavandula latifolia* y *Salvia lavandulifolia* era una semiesfera y que la de *Lygeum spartum* era un cono. A continuación, para procesar los datos se calculó el incremento de volumen entre las dos fechas, como medida de crecimiento durante el experimento. También se calculó el incremento de la superficie ocupada por la vegetación a escala de parcela como la suma de la superficie proyectada por la copa de todas las plantas vivas. Para ello, se calculó el área asumiendo que la copa proyectada en el suelo era una circunferencia en todas las especies. Esto se realizó al inicio y al final del experimento para poder calcular, de este modo, incremento de la superficie ocupada por la vegetación.

♣ La medida fisiológica, que se ha tomado, ha sido la máxima eficiencia fotoquímica del fotosistema II (Fv/Fm) (Demming-Adams & Adams, 1992) mediante un fluorímetro (Hansatech Instruments, Reino Unido). Esta medida es un método para la valoración del grado de estrés o pérdida de rendimiento fotosintético de las plantas en condiciones específicas (Navarro Cerrillo *et al.* 2004). Estas medidas fueron tomadas al inicio, cada dos semanas y al final del experimento. En cada fecha, las mediciones de Fv/Fm fueron tomadas a mediodía después de oscurecer el tejido medido al menos 30 minutos.

♣ Supervivencia. Ésta se ha determinado al final del experimento y se estimó como planta muerta la no emisión de fluorescencia, en todas las especies menos en *Lygeum spartum* en donde se estimó que la planta estaba muerta cuando todas las hojas de la macolla mostraban un color amarillo.

A parte, también se midió la humedad volumétrica del sustrato por medio de un TDR (IMKO Micromodultechnik GMBH, Alemania en seis puntos en cada parcela (dos puntos tomados a tres alturas a lo largo de la pendiente de la parcela, Figura 5). Las varillas del TDR miden 16 cm. Esto se realizó para poder observar los cambios de humedad en el sustrato y relacionar las diferencias de crecimientos y la supervivencia de las plantas con la humedad del sustrato.

Análisis estadísticos

Para la realización de los análisis estadísticos se ha utilizado el paquete informático *Statistica 7.0* (Statsoft Inc.) y la hoja de cálculo Excel 2010 (Microsoft) para el registro de los datos.

En lo que respecta a las medidas fisiológicas y de humedad volumétrica del sustrato, los datos se analizaron a partir de un ANOVA de medidas repetidas. Para el análisis de los datos de Fv/Fm, se consideraron como variables independientes: la especie (con cuatro niveles, las cuatro especies presentes en el experimento), el riego (con tres niveles, 2, 4 y 8 L m⁻² semana⁻¹) y la posición de la parcela (superior e inferior).

Para el análisis de los datos de la humedad del suelo, las variables independientes fueron las mismas que para el anterior, con la salvedad de que para la humedad se tomaron medidas en tres lugares diferentes (ver Figura 7).

Para el análisis de la supervivencia, se utilizó un modelo general linealizado para datos binomiales y una función de enlace logit. Las variables independientes, fueron las mismas que para el análisis de la fluorescencia.

Por último, los datos de crecimiento (incremento de volumen de la parte aérea y de superficie proyectada total a nivel de parcela), se analizaron mediante un ANOVA.

Resultados

Humedad del sustrato

La humedad del sustrato dependió del nivel de riego (Tabla 2). El tratamiento de $2 \text{ L m}^{-2} \text{ semana}^{-1}$ es el que menor humedad tuvo, mientras que el tratamiento de $8 \text{ L m}^{-2} \text{ semana}^{-1}$ es el que mayor humedad presentó, observándose valores intermedios para el tratamiento de $4 \text{ L m}^{-2} \text{ semana}^{-1}$ (Figura 7). La humedad del sustrato se redujo a lo largo del tiempo pero la reducción no fue igual para los niveles de riego (interacción Nivel de Riego \times Tiempo, Tabla 2). Así, la humedad disminuyó rápidamente y de la misma manera para los tres niveles de riego entre el comienzo del experimento hasta la segunda toma de datos. Dicha reducción se fue atenuando en posteriores mediciones, pero de manera diferente entre niveles de riego (Figura 7). La reducción de humedad en el tratamiento de $4 \text{ L m}^{-2} \text{ semana}^{-1}$ se comportó como el tratamiento de $8 \text{ L m}^{-2} \text{ semana}^{-1}$ hasta la tercera medición, en donde pasó a comportarse como el tratamiento con el riego mínimo.

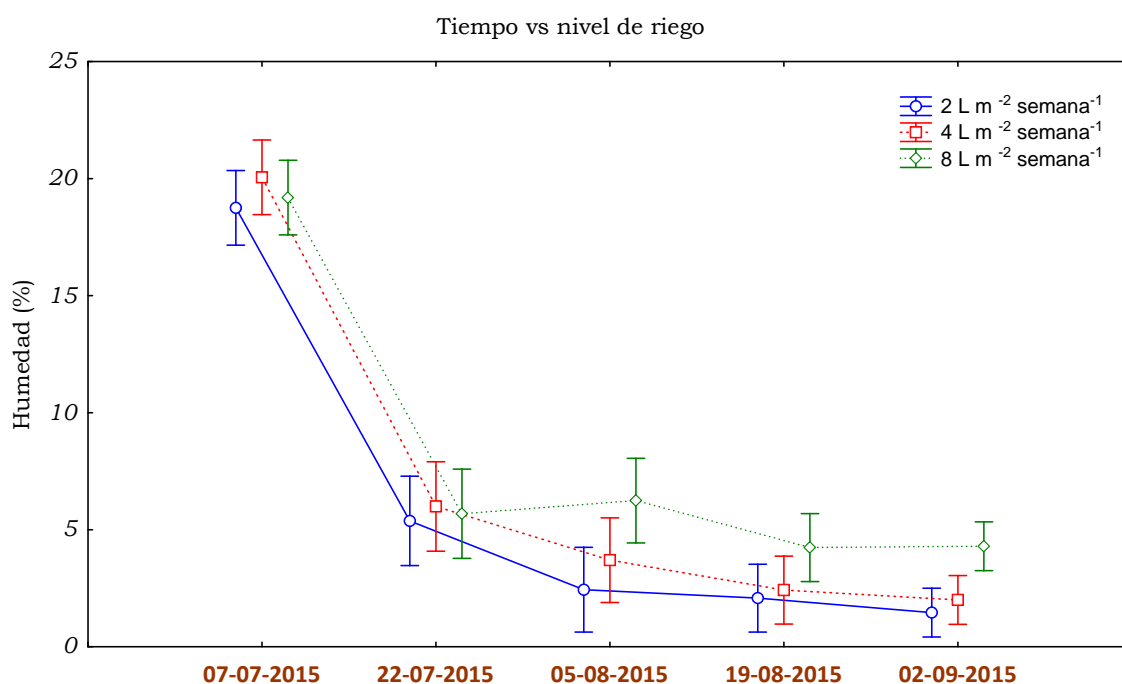


Figura 7. Variación en el tiempo de la humedad volumétrica del sustrato en los tres tratamientos de riego. Los datos son medias \pm intervalo de confianza del 95%.

En lo que respecta al efecto de la posición en la parcela sobre la humedad del sustrato, se observó que se incrementó paulatinamente y de manera significativa desde las partes altas a las partes bajas (Figura 8). No obstante, las diferencias

entre posiciones dependieron del momento de medición (interacción Posición en la parcela \times Tiempo, Tabla 2). Así, al comenzar el experimento la humedad del sustrato en la parte intermedia e inferior de la parcela fueron similares y mayores que la humedad en la parte superior. A medida que avanzó el experimento, las partes inferiores e intermedias presentaron una disminución de humedad parecida a lo largo del tiempo, mientras que la disminución en la parte superior fue más gradual. Al final del experimento, la humedad del sustrato en las partes intermedias y superior de la parcela fueron similares entre sí y menores que la humedad registrada en la parte inferior de la parcela. Es de destacar que en la parte superior de las parcelas, se observó una ligera rehidratación del sustrato con respecto a la fecha previa de medición. Ello fue debido a un episodio de lluvia acaecido tres días antes de la medición (datos climáticos, Anexo IV). Esta rehidratación, en cambio, no afectó a las otras posiciones de la parcela (Figura 8).

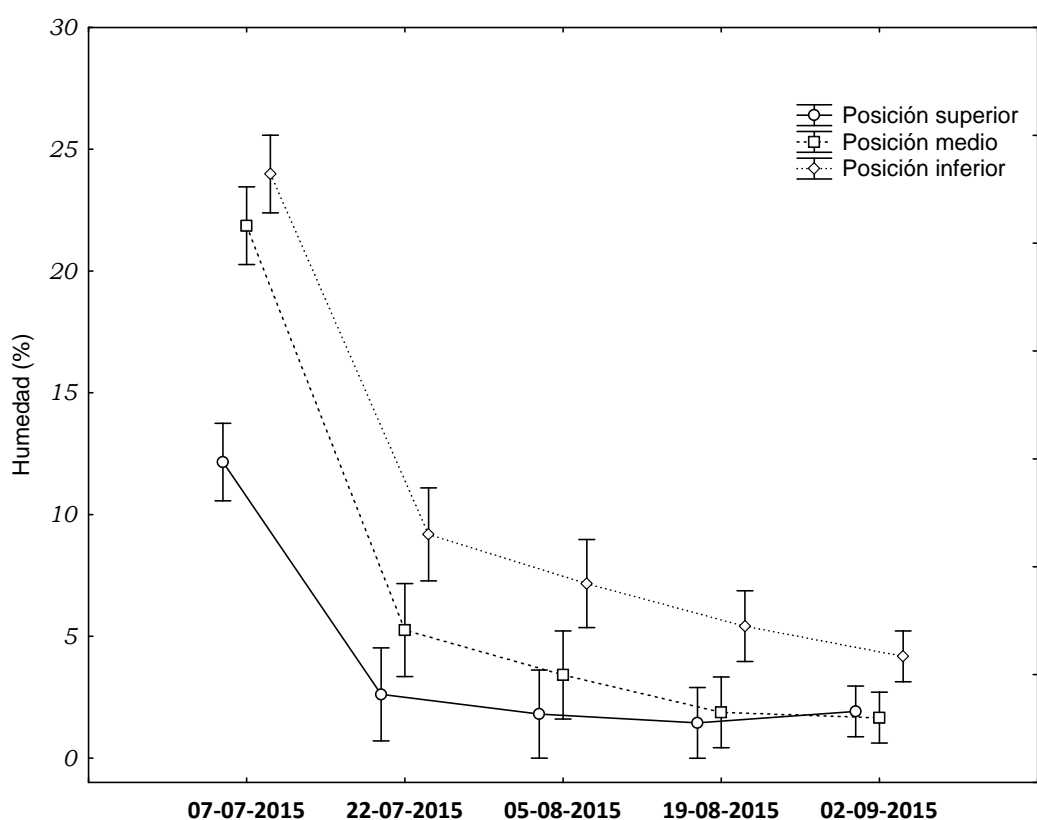


Figura 8. Variación en el tiempo de la humedad volumétrica en el sustrato respecto a la posición en la parcela. Los datos son medias \pm intervalo de confianza del 95%.

Tabla 2. Resultados del ANOVA de medidas repetidas para la humedad volumétrica. Las variables independientes fijas son: Posición en la parcela y nivel de riego

Efecto	SS	Grados de libertad	MS	F	p
Nivel de riego (1)	0,215	2	0,108	4,99	0,011
Posición en la parcela (2)	0,934	2	0,467	21,7	<0,001
Tiempo (3)	3,95	4	0,989	213	<0,001
1 × 2	0,080	4	0,020	0,9	0,457
1 × 3	0,134	8	0,017	3,6	0,001
2 × 3	0,119	8	0,015	3,2	0,002
1 × 2 × 3	0,530	16	0,003	0,7	0,773

Resultados fisiológicos

Se observaron diferencias significativas entre especies en los valores de Fv/Fm (Tabla 3), así como en la posición dentro de la parcela. En cuanto a las interacciones, se observó que las diferencias entre especie se vieron afectadas por la posición en la parcela (Figura 9). En ambas posiciones (mitad superior e inferior), los valores más altos de Fv/Fm los presentó *L. spartum*, mientras que *S. lavandulifolia* mostró los más bajos. *Lavandula latifolia* presentó el segundo valor medio más alto, cercanos a los de *L. spartum*, mientras que *V. pseudocytisus* tuvo unos valores menores que los de *L. latifolia*, pero cerca del doble que los valores de *S. lavandulifolia*. Los valores de Fv/Fm en *Salvia lavandulifolia* y *L. spartum* fueron independientes de la posición en la parcela, mientras que en el resto de las especies los valores de Fv/Fm fueron claramente mayores en la parte superior que en la inferior.

Tabla 3. Resultados del ANOVA de medidas repetidas para la Fv/Fm. Las variables independientes son: especie, posición en la parcela y nivel de riego

Efecto	SS	Grados de libertad	MS	F	p
Especie (1)	17,3	3	5,78	46,5	<0,001
Posición en parcela (2)	3,35	1	3,35	26,9	<0,001
Nivel de riego (3)	1,44	2	0,72	5,78	0,004
1 × 2	1,22	3	0,41	3,28	0,022
1 × 3	0,67	6	0,11	0,90	0,495
2 × 3	0,52	2	0,26	2,09	0,126
1 × 2 × 3	0,26	6	0,04	0,35	0,908
Tiempo (4)	7,45	4	1,86	46,5	<0,001
1 × 4	0,88	12	0,07	1,84	0,039
2 × 4	2,23	4	0,56	13,9	<0,001
3 × 4	1,46	8	0,18	4,57	<0,001
1 × 2 × 4	0,56	12	0,05	1,17	0,303
1 × 3 × 4	0,69	21	0,03	0,72	0,832
2 × 3 × 4	0,87	8	0,11	2,72	0,006
1 × 2 × 3 × 4	0,95	24	0,04	0,99	0,483

El nivel de riego también afectó significativamente F_v/F_m , de forma que el nivel de riego más bajo, de $2 \text{ L m}^{-2} \text{ semana}^{-1}$, fue el que menor valor presentó (una media de 0,484). El nivel de riego superior, $8 \text{ L m}^{-2} \text{ semana}^{-1}$, tuvo los mayores valores de F_v/F_m (0,570), mientras que el nivel de $4 \text{ L m}^{-2} \text{ semana}^{-1}$ presentó unos valores intermedios, aunque muy similares a los del nivel de riego superior (0,552).

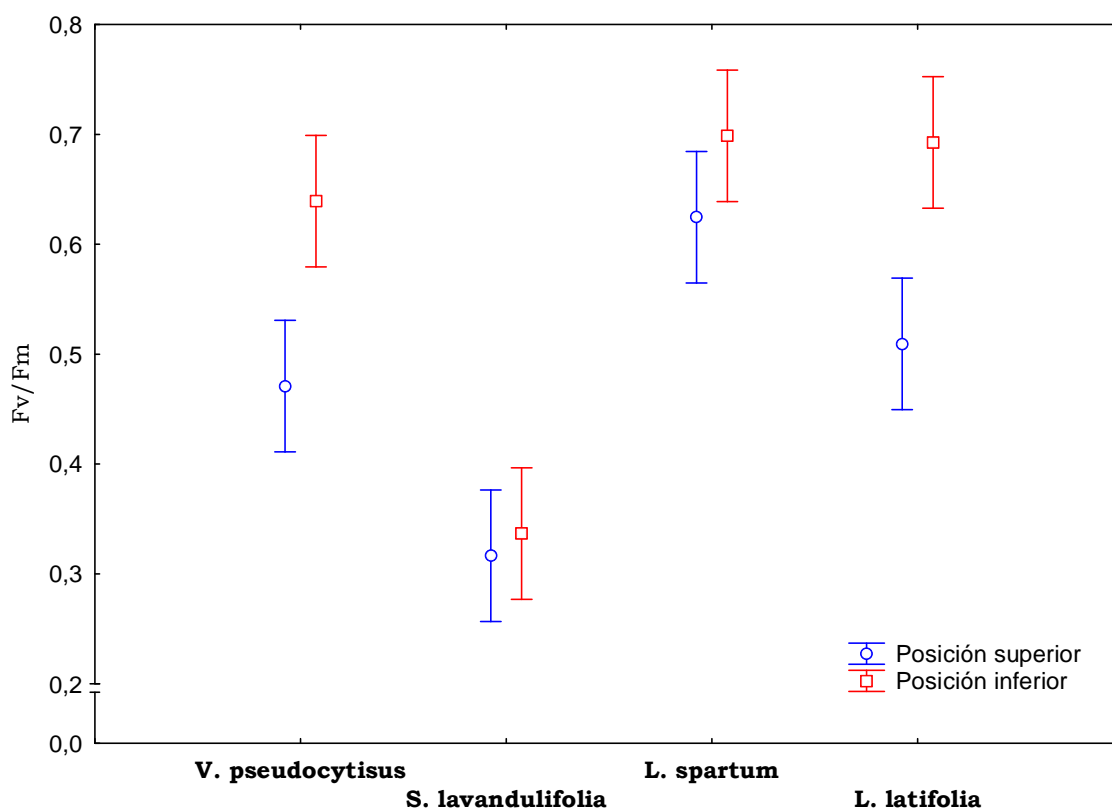


Figura 9. Valores de F_v/F_m en función de las especies y su posición en la parcela. Los datos son medias \pm intervalo de confianza del 95%.

En lo que respecta a la variación de F_v/F_m en el tiempo, los valores de todas las especies fueron reduciéndose paulatinamente en el tiempo (Figura 10). No obstante, se registró un repunte en tres especies (todas menos *L. latifolia*) en la última medición, posiblemente debido al episodio de precipitación que se comentó con anterioridad. Cabe destacar que *S. lavandulifolia* tuvo un gran descenso de la fluorescencia a lo largo de las dos primeras semanas, que fue mayor que el experimentado por las otras tres especies (interacción Especie \times Tiempo, Tabla 3).

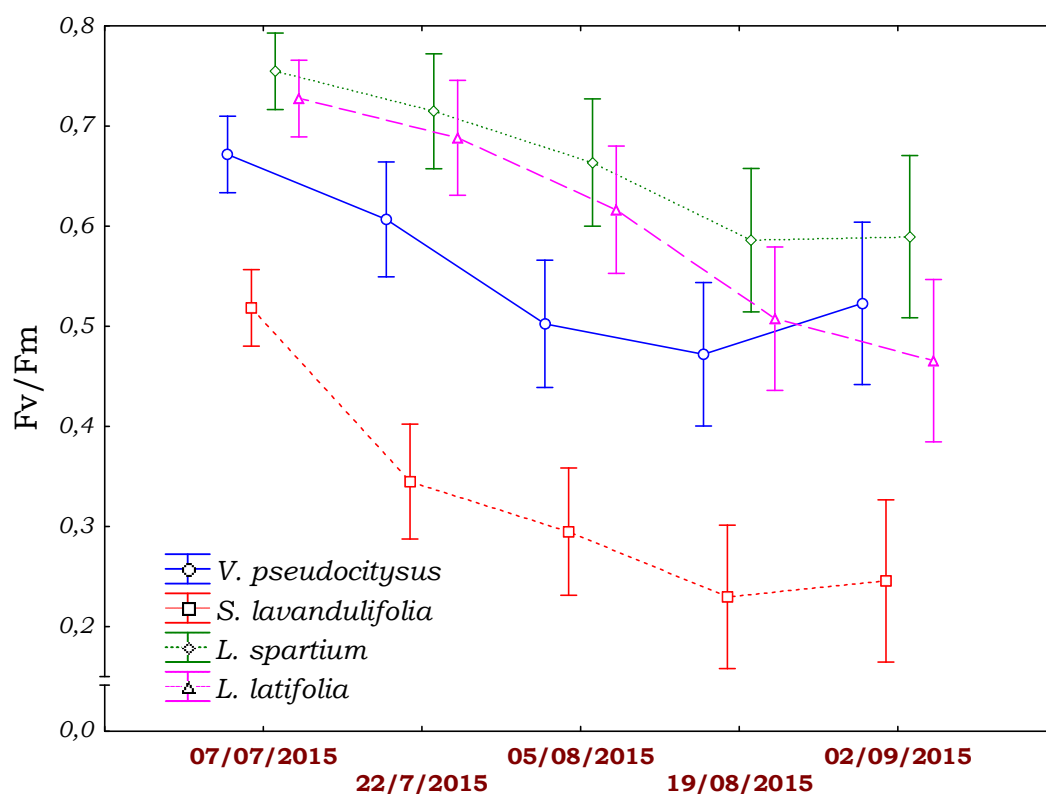


Figura 10. Variación de F_v/F_m en el tiempo en las especies estudiadas. Los datos son medias \pm intervalo de confianza del 95%.

En lo que respecta a la interacción posición \times Tiempo, las plantas situadas en la mitad inferior de las parcelas presentaron menor F_v/F_m que las plantas emplazadas en la mitad superior. No obstante, estas diferencias solo se observaron desde la tercera hasta la última medida (interacción Posición \times Tiempo, Tabla 3). Al final del experimento se observó una diferencia de 0,3 puntos de F_v/F_m entre ambas posiciones. Es de destacar, que el episodio de lluvias de finales de agosto afectó positivamente (recuperación de F_v/F_m) a las plantas de la posición inferior, mientras que produjo una atenuación de la caída de los valores de F_v/F_m en las plantas de la posición superior.

El riego incrementó los valores de F_v/F_m , pero dicho efecto difirió a lo largo del tiempo (interacción especie \times Tiempo, Tabla 3). Hasta la tercera medición, los menores valores de F_v/F_m fueron los del tratamiento $2 \text{ L m}^{-2} \text{ semana}^{-1}$, mientras que los mayores valores de F_v/F_m se registraron con $4 \text{ L m}^{-2} \text{ semana}^{-1}$. A partir de la cuarta, medición, el tratamiento de $8 \text{ L m}^{-2} \text{ semana}^{-1}$ pasó a ser el que mayores valores de F_v/F_m presentó. El episodio de lluvia de finales de agosto afectó positivamente a F_v/F_m en todos los tratamientos de riego excepto en el tratamiento de $2 \text{ L m}^{-2} \text{ semana}^{-1}$.

En las dos primeras mediciones la fluorescencia emitida por las plantas fue independientemente de la posición en la parcela o el tratamiento de riego empleado (Figura 11). A partir de la tercera medición se observó paulatinamente una menor

Fv/Fm en la parte alta de la parcela que en la parte baja. Las diferencias entre tratamientos de riego se observaron también a partir de la tercera medición y las diferencias descritas previamente se observaron en la mitad superior de las parcelas pero no en las partes bajas (Interacción Tiempo × Posición × Riego, Tabla 3).

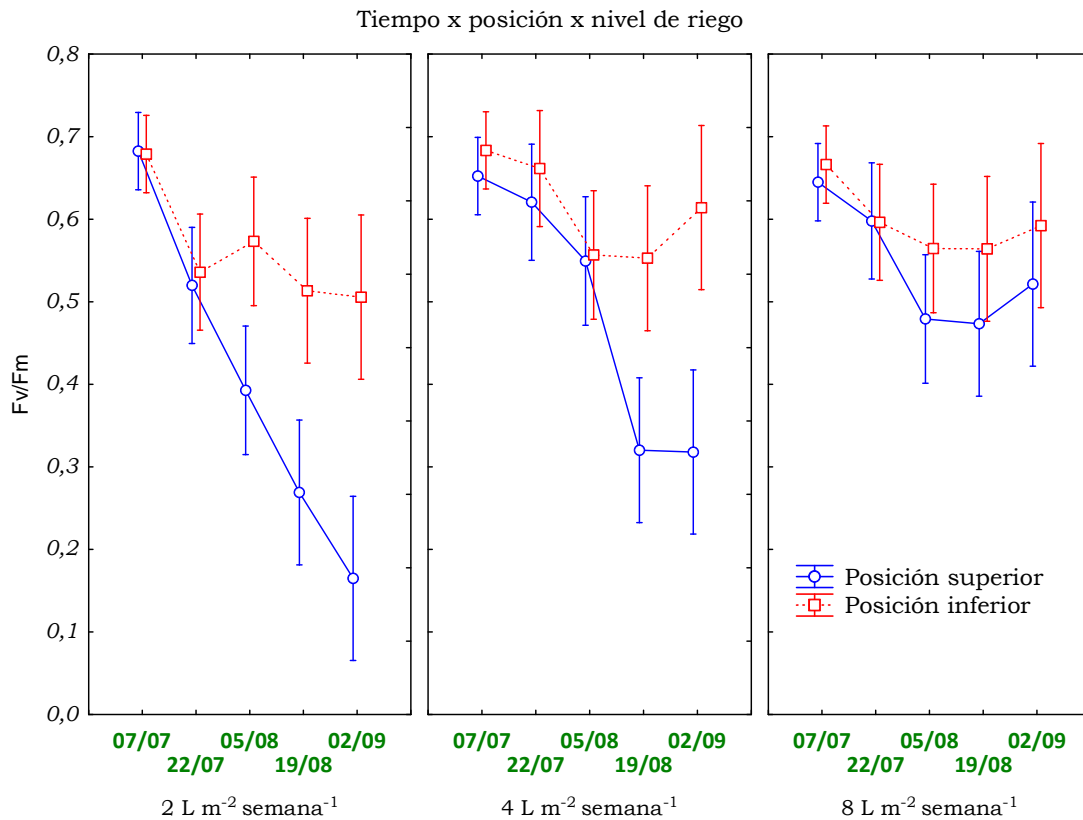


Figura 11. Variación de la fluorescencia en el tiempo con respecto al nivel de riego y la posición en la parcela. Los datos son medias \pm intervalo de confianza del 95%.

Supervivencia

Las especies presentaron diferencias significativas de supervivencia ($\chi^2 = 22,64$; $p < 0,001$; Figura 12). La especie que mayor supervivencia tuvo ha sido *L. spartum*, mientras que *S. lavandulifolia* presentó la menor supervivencia, siendo la mitad de la supervivencia de *L. spartum*. Tanto *V. pseudocytisus* como *L. latifolia*, han tenido valores de supervivencia intermedios. La evolución de la supervivencia en el tiempo de cada especie se puede observar en el Anexo III.

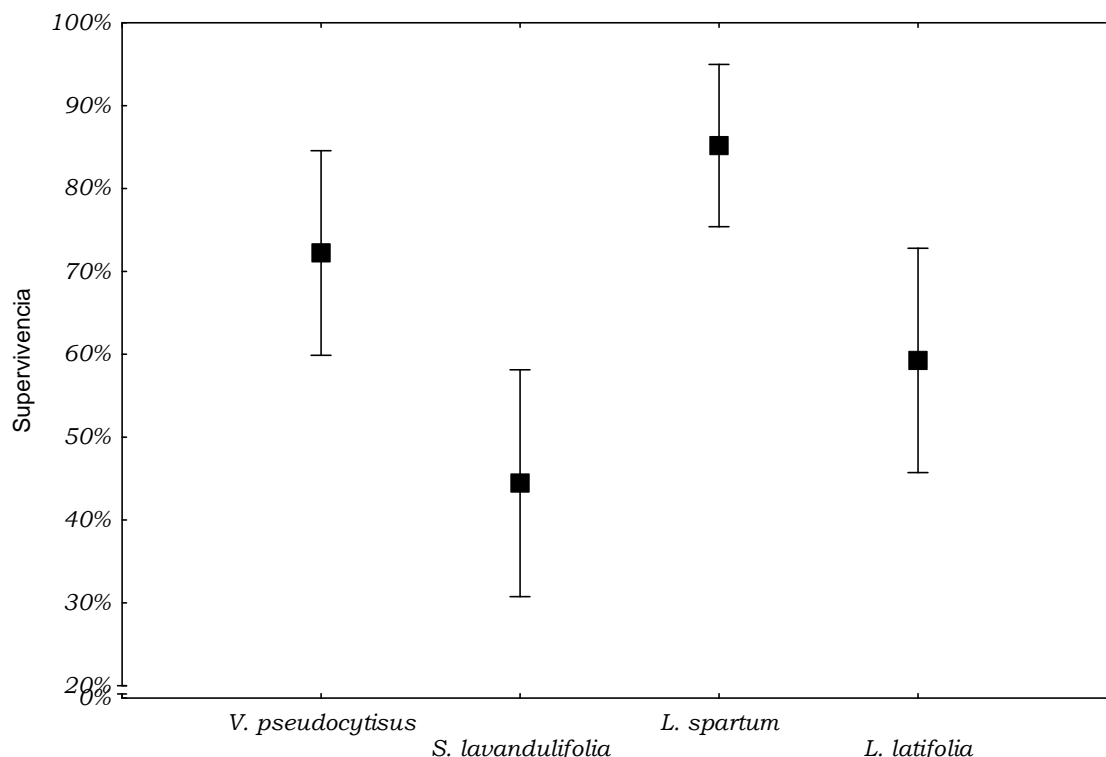


Figura 12. Supervivencia de las especies al final del experimento. Los datos son medias \pm intervalo de confianza del 95%.

La supervivencia también ha dependido de la posición en la parcela ($\chi^2 = 28,99$; $p < 0,001$), de modo que la parte superior de las parcelas presentó aproximadamente la mitad de la supervivencia que en la parte inferior. Por último, el nivel de riego también afectó significativamente a la supervivencia ($\chi^2 = 10,67$; $p < 0,005$). La supervivencia para el nivel de riego más bajo ($2 \text{ L m}^{-2} \text{ semana}^{-1}$), fue un 52%, mientras que las plantas del nivel de riego superior ($8 \text{ L m}^{-2} \text{ semana}^{-1}$) mostraron una supervivencia del 75%. Las plantas del tratamiento de riego intermedio ($4 \text{ L m}^{-2} \text{ semana}^{-1}$) presentaron una supervivencia del 68%. No se observaron interacciones significativas entre factores en la supervivencia.

Crecimiento

Incremento de volumen. No se apreciaron efectos estadísticamente significativos de la Especie ni el riego en el crecimiento (Tabla 4). En cambio, se observó un efecto significativamente marginal del efecto de la Posición en la parcela, de manera que en las partes bajas el incremento de volumen fue mayor que en las partes altas. Aunque la posición en la parcela no tiene una diferencia estadísticamente significativa, en la Figura 13, se puede observar que han existido unas diferencias muy notables. En la posición inferior, el incremento de volumen fue de 421 cm^3 , mientras que en la posición superior ha sido de 8 cm^3 .

Tabla 4. Resultados del ANOVA para el incremento del volumen. Las variables independientes son: Posición en la parcela, nivel de riego y especie.

Efecto	SS × 10 ⁶	Grados de libertad	MS × 10 ⁶	F	p
Especie (1)	7,9	3	2,6	2,05	0,11
Posición parcela (2)	4,8	1	4,8	3,76	0,054
Nivel de riego (3)	0,9	2	0,4	0,35	0,70
(1) x (2)	2,7	3	0,9	0,71	0,54
(1) x (3)	5,1	6	0,8	0,66	0,68
(2) x (3)	5,9	2	2,9	2,29	0,11
(1) x (2) x (3)	7,6	6	1,2	0,99	0,43

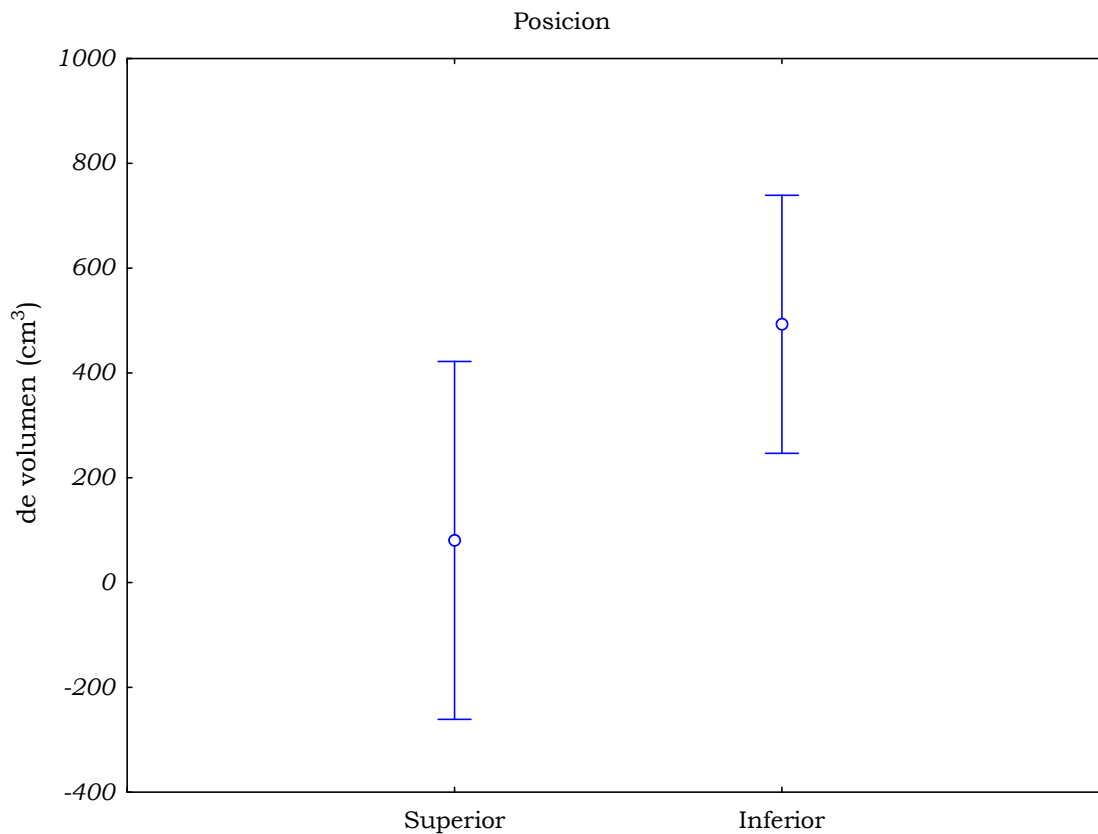


Figura 13. Incremento de volumen con respecto a la posición en la parcela. Los datos son medias ± intervalo de confianza del 95%.

Incremento de la superficie proyectada por la copa. Según los resultados estadísticos, ha habido un efecto significativo de la posición de en parcela (Tabla 5). Tal y como se puede observar en la Figura 14, la superficie ocupada las plantas se incrementó en la parte inferior de la parcela mientras que la superficie se redujo en la parte superior. No se han apreciado un efecto del riego en el incremento de la superficie de proyección de la copa.

Tabla 5. Resultados del ANOVA para el incremento de la superficie proyectada por la copa. Las variables independientes son: Posición en la parcela y nivel de riego.

Efecto	SS × 10 ⁷	Grados de libertad	MS × 10 ⁷	F	p
Posición parcela (1)	9,99	1	9,99	13,73	0,003
Nivel de riego (2)	2,88	2	1,44	1,98	0,181
(1) × (2)	0,91	2	0,097	0,13	0,876

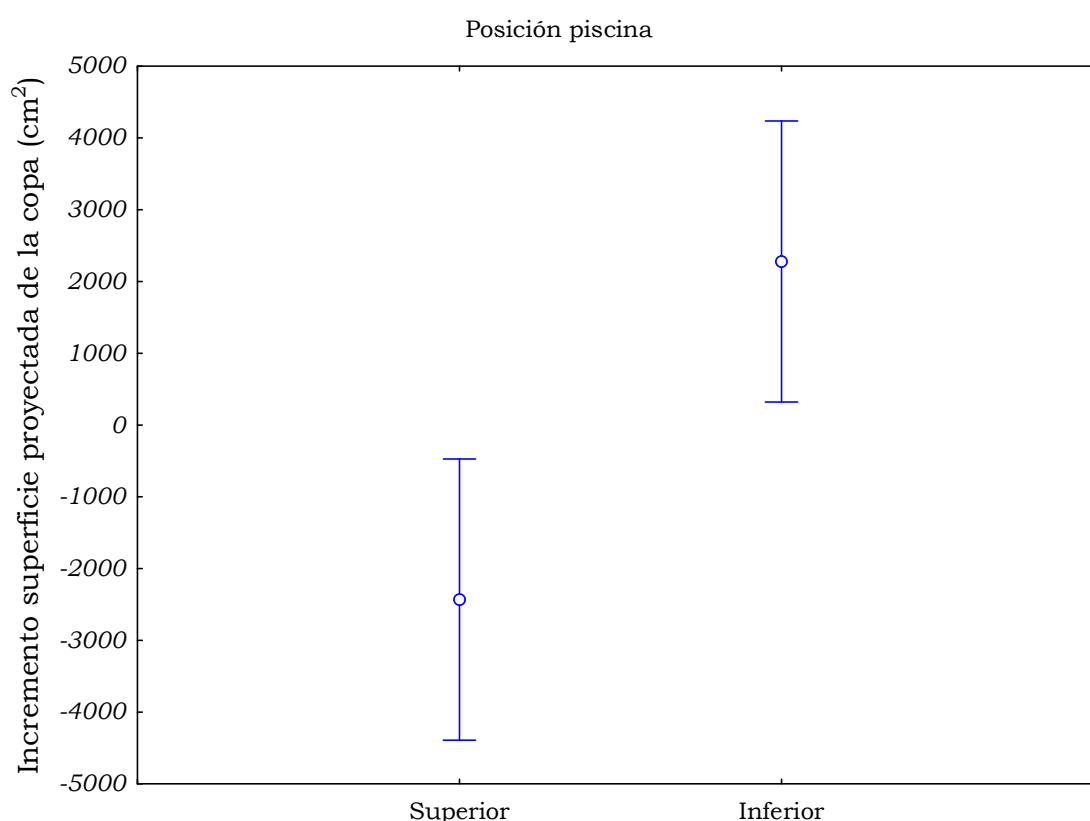


Figura 14. Incremento de la superficie proyectada por la copa al final del experimento. Los datos son medias ± intervalo de confianza del 95%.

Discusión

El objetivo principal del experimento ha sido establecer un riego mínimo que permita la supervivencia de las plantas y mantener la funcionalidad de la cubierta vegetal durante el verano bajo condiciones climáticas mediterráneas. Los resultados, señalan que la supervivencia de las plantas depende de la especie y del nivel de riego que se utilice. La significativa menor supervivencia con un riego de 2 L m⁻² semana⁻¹, claramente apunta a que dicho nivel de riego no permite un

desarrollo adecuado de las plantas. Ello impondría una reducción de la biomasa vegetal en la cubierta con la consecuente necesidad de reponer marras en otoño. Además, una cobertura moderada a alta de plantas es necesaria para conseguir los beneficios que aportan las plantas en las cubiertas vegetales. Según Cook-Patton & Bauerle (2010), el incremento de biomasa puede mejorar múltiples servicios ecosistémicos, por ejemplo, una mayor cobertura aumenta el albedo sobre las cubiertas vegetales (Li & Yeung, 2014), lo cual influye en el remedio contra la isla de calor, o permite una mayor captación de agua en episodios de lluvia (Cook-Patton & Bauerle, 2012).

Los tratamientos de 4 y 8 L m⁻² semana⁻¹ no han mostrado unas grandes diferencias en cuanto a la supervivencia (del 68% y del 75%, respectivamente). Sin embargo, recomendamos regar 8 L m⁻² semana⁻¹ para el mantenimiento de una cubierta vegetal ya que las plantas permanecen más activas y vigorosas, a tenor de los datos fisiológicos (Figura 10). Además, con este nivel de riego las diferencias entre la parte alta y la parte baja de la parcela fueron pequeñas. El componente estético también debe ser uno de los principales objetivos de los planificadores de las cubiertas vegetales (Fernández-Cañero *et al.*, 2011) y plantas con mal aspecto no contribuye a ello.

Las diferencias de supervivencia ligadas al nivel riego, se explican por el mayor estrés experimentado por las plantas con la reducción del riego, tal como avalan las medidas de fluorescencia (ver Figura 10). Fv/Fm es una medida del grado de fotoinhibición del fotosistema PSII y, por tanto, de la pérdida de rendimiento fotosintético de la planta (Hao *et al.* 2011). Una elevada fotoinhibición sostenida en el tiempo puede reducir la supervivencia de las plantas y su capacidad reproductiva (Aragón *et al.* 2008). El mayor estrés sufrido por las plantas en el tratamiento 2 L m⁻² semana⁻¹ es posiblemente debido a la muy baja humedad en el sustrato (ver Figura 7). Igualmente, la reducción de Fv/Fm a lo largo del experimento, posiblemente también se deba a que la humedad del sustrato ha ido disminuyendo intensamente a lo largo del experimento. Por tanto, nuestros resultados indican que la supervivencia de las plantas está relacionada con el comportamiento fisiológico de las plantas y ésta, en última instancia, con la humedad en el sustrato.

La humedad en el sustrato ha variado entre tratamientos de riego y en el tiempo. Al principio del experimento, la humedad era muy alta debido al elevado riego dado durante el establecimiento de las plantas y a la elevada capacidad de retención de humedad que presentaba el sustrato. El sustrato, compuesto por vermiculita y perlita, dos arcillas expansivas que tiene gran capacidad de almacenamiento hídrico, lo cual es una herramienta muy eficaz para la retención de la humedad.

El buen estado fisiológico inicial de las plantas (presumiblemente también con alta capacidad de transpiración), junto con el cese del riego, produjo la drástica caída de la humedad del sustrato (Wolf & Lundholm, 2008). Las plantas actúan

como bombas hídricas y por medio de la evapotranspiración, hacen perder humedad al sustrato (Jim & Peng, 2012). La evapotranspiración depende de la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad y el viento (Allen *et al.*, 1998).

El riego y la precipitación condicionan también la humedad del sustrato. Una muestra de la importancia de la precipitación en la humedad del sustrato ha sido el ligero incremento de la humedad en la parte superior de las parcelas después de la precipitación que se produjo 3 días antes de la conclusión del experimento. Este aumento de humedad produjo, a su vez, un aumento de Fv/Fm, lo cual indica una recuperación del estado fisiológico de las plantas.

El riego no afectó el crecimiento de las plantas en ninguna especie. Este es un resultado interesante, puesto que el riego de mantenimiento en verano no debe estimular el crecimiento de las plantas en una época tan desfavorable para ellas como es el verano. El crecimiento debe concentrarse durante la primavera y otoño cuando la precipitación y temperaturas moderadas estimulen el crecimiento y floración sin necesidad de riego de mantenimiento. Sin embargo, el crecimiento en volumen se incrementó ligeramente en la parte baja de la parcela, mientras que no varió en las partes altas.

Debido a la mayor supervivencia y crecimiento en las partes altas de las parcelas, la superficie ocupada por la vegetación se ha incrementó ligeramente en las partes bajas. En cambio, se redujo en las partes altas debido a la elevada mortandad y el escaso crecimiento de las plantas en estas partes de las parcelas.

Tanto la posición en la parcela como la humedad del sustrato han condicionado el desarrollo de la planta en nuestra cubierta vegetal. Un ejemplo de la importancia de la humedad del sustrato es el trabajo de González del Pino (2014), en el que concluyó una relación negativa entre la supervivencia de las plantas y el espesor de sustrato. Otro ejemplo de la influencia de la profundidad del sustrato en el desarrollo de las cubiertas vegetales es el experimento de Benvenuti & Bacci (2010), donde observaron que las plantas que crecían en sustratos de 15 cm tenían un menor estado fisiológico y crecimiento, con respecto a las plantas que crecieron en sustratos de 20 cm. Esto se puede deber a que los sustratos con menos profundidad, tienen una menor capacidad de retención de agua (Stovin *et al.*, 2012; Dunnet & Kingsbury, 2012; González del Pino, 2014).

El peor desarrollo de las plantas en las partes altas de las parcelas se puede explicar por dos motivos. La primera, es una reducción del espesor de sustrato. Por el contrario, se puede observar que las plantas que se han desarrollado sobre la parte inferior de la parcela y que, a su vez, han tenido el mayor régimen de riego, han sido las plantas que más han incremento de volumen han presentado. El segundo motivo, es que la posición en la parcela está influida por la pendiente con la que se construyó la parcela al principio del experimento. Al igual que en nuestro estudio, Getter *et al.* (2007) demostraron como la pendiente disminuye la retención de agua en el sustrato, de modo que las partes altas van perdiendo agua paulatinamente y van teniendo, a lo largo del tiempo, una humedad menor que las

partes bajas, las cuales van recibiendo, por gravedad el agua de las partes altas de las cubiertas vegetales. Además, la pendiente hace que pueda existir un transporte tanto de nutrientes, como de sustrato ladera abajo por acción del viento y de la gravedad.

Nuestros resultados, por tanto, indican que en la planificación de una cubierta vegetal, hay que tener en cuenta la acción de la pendiente para establecer la especie y su posición dentro de la parcela, así como hay que tener en cuenta el riego. En la parte superior, tenemos que poner las especies más resistentes a la sequía o disminuir su densidad y viceversa. En lo que respecta al riego, debería ser mayor en las partes superiores que en las inferiores para compensar el efecto de la gravedad o la diferencia de espesor del sustrato.

Por tanto, podemos afirmar que si queremos que nuestra cubierta vegetal cumpla con los beneficios que hemos descrito en la introducción, las plantas tienen que tener un buen desarrollo. Para ello, en ambientes mediterráneos, tenemos que tener un sustrato de al menos 20 cm si queremos asegurarnos una supervivencia superior al 70%. Además, también podemos asegurar que con un riego superior a los 4 L m⁻² semana⁻¹, la supervivencia asociada a las plantas permite que haya una cobertura aceptable en las cubiertas vegetales. Aun así, no creemos que comercialmente el estado visual de la planta atraiga al consumidor con un riego de 4 L m⁻² semana⁻¹, por lo que desde aquí, recomendamos aplicar un riego de, al menos 8 L m⁻² semana⁻¹ durante la época estival. Además, un riego moderado permite mantener una elevada diversidad de plantas en las cubiertas vegetales, mientras que riego deficitarios la reducen (MacIvor *et al.* 2013).

Las plantas juegan un rol clave en funcionamiento de una cubierta vegetal, ya hemos recalcado la importancia de la cobertura en relación con los servicios ecosistémicos. Un ejemplo de ello se puede observar en el estudio de MacIvor & Lundholm (2011), en el cual determinaron que el enfriamiento que genera la cubierta vegetal depende de las especies elegidas. Además, como los monocultivos son menos productivos que las comunidades o mezclas de especies en las cubiertas vegetales (Lundholm *et al.* 2010), es vital conocer las diferencias en el crecimiento y en la supervivencia de las mismas. En lo que respecta a las especies que hemos estudiado, *V. pseudocytisus* se ha comportado como una especie resistente (puesto que ha tenido unos valores de supervivencia global del 72%) que para un riego de 8 L m⁻² semana⁻¹ aumentaron al 88%. El inconveniente de esta especie ha sido su lento crecimiento (ha sido la segunda especie que menos ha crecido). Con los datos de supervivencia en la mano y considerando que *V. pseudocytisus* actualmente está incluida en el Atlas y Libro Rojo de la Flora Vascular Amenazada en España, recomendamos su uso en cubiertas vegetales, sobre todo, del centro peninsular.

L. latifolia ha sido una especie que ha tenido unos discretos valores de supervivencia (inferiores al 60%), datos que concuerdan con los resultados de González (2014). Sin embargo, ha sido la segunda especie que mayor desarrollo de la parte aérea ha producido, así como de su proyección de la copa (lo cual incide en

la sombra). Por esta razón, puede ser una planta muy recomendable para su inclusión en proyectos de instalación de cubiertas vegetales, sobre todo si se introduce en cubiertas vegetales con un riego superior a 4 L m⁻² semana⁻¹, que son las que han presentado valores de supervivencia del 100%. En el tratamiento con mayor riego, mucho de los individuos supervivientes han presentado una nueva floración al final del verano.

L. spartum ha sido una planta peculiar ya que ha sido la que mayor supervivencia ha presentado, cosa esperable ya que es la planta muy adaptada a sustratos con poca humedad y alta salinidad y ambientes con altas temperaturas (Díaz & Honrubia, 1993). Esto se ajusta a las características de sustrato y de clima las cubiertas vegetales del sistema mediterráneo. Sin embargo, ha sido la especie que, a corto plazo, menos crecimiento ha presentado, por ello creemos que puede ser una buena planta a introducir en los diseños de plantación, aunque siempre deberá estar acompañado de especies que presenten un crecimiento mayor. Resultados muy parecidos de supervivencia y crecimiento se han encontrado en el trabajo de González (2014).

S. lavandulifolia ha tenido un comportamiento muy curioso debido a que pese a que ha sido la especie que menor supervivencia ha desarrollado, ha sido la especie que más crecimiento ha tenido. Según Navarro y Palacios (2004) un retraso en la época de plantación le hace disminuir a la especie su establecimiento, por ello, la tardía plantación en nuestra cubierta vegetal ha podido influir significativamente en la supervivencia de la misma y posiblemente de las demás especies, sin embargo, en lo que respecta a aspecto y calidad de la planta, ha tenido un crecimiento muy alto. Todo ello nos hace pensar que si plantamos esta planta en la época adecuada y con un riego mínimo de 8 L m⁻² semana⁻¹, podemos asegurarnos una gran cobertura y un gran porcentaje de supervivencia.

Con lo mencionado anteriormente, es importante destacar que durante la realización del experimento, se han registrado temperaturas mucho más altas de la media, siendo uno de los veranos más calurosos desde que se hay registros. Esto ha producido un gran estrés a las plantas ya que el calor, hace aumentar la evapotranspiración (Mentens *et al.*, 2006). Por último cabe destacar que bajo un verano más próximo a la media el desarrollo hubiese sido algo mejor.

Conclusiones

- El aumento de riego estival incrementó la supervivencia y mejoró el estado fisiológico de las plantas. Un riego de 2 L m⁻² semana⁻¹ es insuficiente para mantener niveles adecuados de supervivencia y plantas fisiológicamente activas. En cambio un nivel de riego de 8 L m⁻² semana⁻¹ permite un nivel de supervivencia y vitalidad de las plantas suficiente.

- La posición en la cubierta afectó la fotoinhibición y supervivencia de las plantas, especialmente si el riego es moderado o deficitario. Las plantas de la parte alta de las parcelas presentó una clara menor supervivencia y estaban más fotoinhibidas que las plantas de la parte inferior.
- En lo que respecta al comportamiento de las especies, el ordenamiento de las especies por supervivencia fue *L. spartum*>*V. pseudocytisus*>*L. latifolia*> *S. lavandulifolia*. Consideramos a *L. spartum*, como una especie óptima para su inclusión en cubiertas vegetales con las características climáticas aquí presentes. A pesar de los pobres niveles de supervivencia, también recomendamos *S. lavandulifolia* por su gran crecimiento, incluso en épocas de sequía acentuada.

Agradecimientos

La realización de este proyecto no hubiese sido posible sin la participación de Pedro Villar cuya aportación ha sido decisiva tanto en la parte constructiva, como en la parte académica. También he de agradecer la colaboración de los trabajadores del Real Jardín Botánico Juan Carlos I de Alcalá de Henares, en especial a Beatriz, Gema y Raúl por su amabilidad y apoyo en la parte constructiva de la cubierta vegetal.

Bibliografía

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, Italy, <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm>.
- Akbari, H. 2002. Shade trees reduce building energy use and CO2 emissions from power plants. *Environmental Pollution* 116, 119–126.
- Aragón, C.F., Escudero, A., Valladares, F., 2008. Stress-induced dynamic adjustments of reproduction differentially affect fitness components of a semi-arid plant. *J.Ecol.* 96, 222–229.
- BBVA. Disponible en: <http://blog.ciudadbbva.es/fotos/89/>. Consultado el 28 de julio de 2015.
- Benvenuti, S. & Bacci, D., 2010. Initial agronomic performances of Mediterranean xerophytes in simulated dry green roofs. *Urban ecosyst* 13, 349-363.
- Berretta, C., Poë, S. & Stovin, V., 2014. Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: the influence of vegetation and substrate characteristics. *J. Hydrol* 511, 374–386.

- Brenneisen, S., 2005. The Natural Roof (NADA). Research Project Report of the use of Extensive Green Roofs by Wild Bees. University of Wädenswil. Switzerland.
- Cámara de Comercio Chilena. Corporación del Desarrollo Tecnológico. Recomendaciones Técnicas para Proyectos de Cubiertas Vegetales. Disponible en: <http://cubiertasvegetales.cdt.cl>
- Castroviejo, S. (coord. gen.). 1986-2012. Flora ibérica 1-8, 10-15, 17-18, 21. Real Jardín Botánico, CSIC, Madrid.
- Castleton, H.F., Stovin, V., Beck, S.B.M., Davison, J.B., 2010. Green roofs: building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*. 42(10), 1582–91.
- Cook-Patton, S., Bauerle, T., 2012. Potential benefits of plant diversity on vegetated roofs: a literature review. *J. Environ. Manag.* 106, 85-92.
- Currie, B.A. & Bass, B., 2008. Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. *Urban Ecosyst.* 11, 409–422.
- Currie, B.A. & Bass, B., 2010. Using Green Roofs to Enhance Biodiversity in the City of Toronto. Disponible en: http://www1.toronto.ca/city_of_toronto/city_planning/zoning_environment/files/pdf/greenroofs_biodiversity.pdf. Consultado el 6 de Agosto de 2015.
- Demmig-Adams, B. & Adams, W., 1992. Photoprotection and other responses of plants to high light stress. *Ann. Rev. Plant. Physiology. Plant Mol. Biol.* 43: 599-626.
- Díaz, G., Honrubia, M., 1993. Respuestas de crecimiento del albardín (*Lygeum spartum* L.) a la inoculación con hongos micorrícicos y a la fertilización fosforada. *Cryptogamie Mycologie* 14, 117-125.
- Dunnett, N. P. & Kingsbury, N., 2010. *Planting Green Roofs and Living Walls*. Timber Press. Portland, Estados Unidos de América.
- Fernández-Cañero, R., Emilsson, T., Fernández-Barba, C. & Herrera Machuca, M.T., 2013. Green roof systems: a study of public attitudes and preferences in southern Spain. *J Environ Manage* 128, 106–115.
- Francis, R. A. & Lorimer, J., 2011. Urban reconciliation ecology: the potential of living roofs and walls. *Journal of Environmental Management* 92, 1429–1437.
- Flora vascular. Consultado el 22 de febrero de 2015. Disponible en: <http://www.floravascular.com/index.php?spp=Salvia%20lavandulifolia>.
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau – FLL., 2002. Guidelines for the Planning, Execution and Upkeep of Green-roof sites.

- Getter, K.L., Rowe, D.B., Andresen, J.A., 2007. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecol. Eng.* 31, 225–231.
- Gómez Sal, A. 2005., Apuntes para una historia ecológica de Alcalá de Henares y su Universidad. *Anales Complutenses*, 17: 25-68 p. Institución de Estudios Complutenses. Alcalá de Henares. Madrid.
- González del Pino, D., 2014. Viabilidad de las plantas de los espartales y jarales para la construcción de techos verdes en clima mediterráneo continental. Proyecto de Fin de Máster. Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas. Septiembre 2014.
- Graceson, A., Hare, M., Hall, N. & Monaghan, J., 2014. Use of inorganic substrates and composted green waste in growing media for green roofs. *Biosyst. Eng.* 124, 1–7.
- Gregoire, B. G., & Clausen, J. C., 2011. Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. *Ecological Engineering*, 37, 963–969.
- Hao, J., Zhang, L., Zheng, C., Bai, X, Li, W., 2011. Difference in chlorophyll fluorescence parameters and water content in heteromorphic leaves of *Populus euphratica* form Inner Mongolia, China. *For. Stud. China* 13(1): 52-56.
- IGRA., 2007. Green Roof in Madrid, vol. 3. Green Roof News. Disponible en: http://www.igra-world.com/links_and_downloads/images_dynamic/IGRA_Green_Roof_News_1_07.pdf. Consultado el 14 de julio de 2015.
- IGRA., 2006. Green Roof Worldwide. Disponible en: http://www.igra-world.com/green_roofs_worldwide/article/40_Green_Roof_Santander_Spain.pdf. Consultado el 14 de julio de 2015.
- Instituto de Estadística de Navarra. Consultado el: 18 de febrero de 2015. Disponible en: http://www.cfnavarra.es/agricultura/informacion_agraria/MapaCultivos/htm/sp_lygeum_spartum.htm.
- Jim, C.Y., Peng, L.L.H., 2012. Substrate moisture effect on water balance and thermal regime of a tropical extensive green roof. *Ecol. Eng.* 47, 9–23.
- Johnston, J. & Newton, J., 2004. *Building Green: A Guide to Using Plants on Roofs, Walls and Pavements*, London: London Ecology Unit.
- Köhler, M. & Poll, P.H., 2010. Long-term performance of selected old Berlin greenroofs in comparison to younger extensive green roofs in Berlin. *Ecological Engineering* 36, 722-729.
- Köppen, W., 1936. “Das Geographische System der Klimate”. In Köppen and Geiger (eds) *Handbuch der Klimatologie*, Vol I, Part C, Gebrüder Borntraeger, Berlin.

- Kristjánsdóttir, S., Macchioni, N. & Lazzeri, S., 2001. An Icelandic medieval church made of drift timber, – the implications of the wood identification. *Journal of Cultural Heritage* 2, 97-107.
- Liu, K. & B. Baskaran., 2003. Thermal Performance of Green Roofs Through Field Evaluation. National Research Council of Canada. Report No. NRCC-46412. Disponible en: <http://archive.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc46412/nrcc46412.pdf>. Consultado el 23 de julio de 2015.
- Li, W. C. & Yeung, K. K. A., 2014. A Comprehensive Study of Green Roof Performance from Environmental Perspective. *International Journal of Sustainable Built Environment* 3(1), 127- 134.
- Livingroof. Disponible en: <http://livingroofs.org/greenroofbenefits>. Consultado el 07 de agosto de 2015.
- Lundholm, J.T., MacIvor, J.S., MacDougall, J.Z., Ranalli, M.A., 2010. Plant species and functional group combination affect green roof ecosystem functions. *PLoS One* 5, e9677, doi:10.1731/journal.pone.0009677
- Magill, J. D., Midden, K., Groninger, J. & Therrell, M., 2011. A History and Definition of Green Roof Technology with Recommendations for Future Research. *Research Papers. Paper 91*. Disponible en: http://opensiuc.lib.siu.edu/gs_rp/91.
- MacIvor, J.S., Lundholm, J., 2011. Performance evaluation of native plant suited to extensive green roof conditions in a maritime climate. *Ecol. Eng.* 37, 407-417.
- MacIvor, J.S., Margolis, L., Puncher, C.L., Carver Matthews, B.J., 2013. Decoupling factors affecting plant diversity and cover on extensive green roofs. *J Environ Manage* 130:297–305.
- Massetti L, Petralli M, Brandani G & Orlandini S., 2014. An approach to evaluate the intra-urban thermal variability in summer using an urban indicator. *Environ Pollut.* 192, 259–65.
- Mentens, J., Raes, D., Hermy, M., 2006. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanised 21st century. *Landscape Urban Plan.* 77, 217–226.
- Minke, G., 2004. *Techos verdes: Planificación, ejecución, consejos prácticos*. 1ª Edición. Ed. Fin de Siglo, Uruguay.
- Montero, J.L., Salas, M.C., Díaz, J.G., Guzmán, M., Heredia, E., 2013. Evaluación hídrica de cubiertas ajardinadas para su uso en arquitectura bioclimática en zonas mediterráneas de clima árido y semi-árido. *Actas VII Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas*.

- Montero, J.L., Salas, M.C., Guzmán, M., Pérez, N., 2014. Comportamiento de especies mediterráneas en cubiertas ajardinadas con uso de aguas jabonosas. Actas VI Congreso Ibérico de Horticultura Ornamental.
- Naciones Unidas., 2009. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision. Disponible en: <http://esa.un.org/unpd/wup/Highlights/WUP2014-Highlights.pdf>. Consultado el 6 de agosto de 2015).
- Nagase, A., Dunnett, N., & Choi, M.-S., 2013. Investigation of weed phenology in an establishing semi-extensive green roof. *Ecological Engineering*, 58, 156–164.
- Navarro Cerrillo, R. Mº., Maldonado-Rodríguez, R. & Ariza Mateos, D., 2004. Fluorescencia de la clorofila en cinco procedencias de *P. halepensis* Mill. y su respuesta al estrés hídrico. *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.* 17: 69-74.
- Navarro, R. M. y Palacios, G., 2004. Efecto de la calidad de planta, el procedimiento de preparación y la fecha de plantación en la supervivencia de una repoblación de *Pinus pinea* L. *Cuadernos de la S.E.C.F.* 17: 199-204.
- Ntoulas N., Panayiotis, A. N., Spaneas, K. & Kadoglou, N., 2012. Semi-extensive Green roof substrate type and depth effects on *Zoysia matrella* “Zeon” growth and drought tolerance under different irrigation regimes. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B, Soil and Plant Science*; 62 (1): 165-173.
- ONU., 2014. Disponible en: http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/water_cities.shtml. Consultado el 28 de julio de 2015.
- Olivieri, F., Di Perna, C., D’Orazio, M., Olivieri, L., Neila, J. 2013. Experimental measurements and numerical model for the summer performance assessment of extensive green roofs in a mediterranean coastal climate. *Energy Build.* 63, 1–14.
- Palla, A., Lanza, L.G. & La Barbera, P. 2008. A green roof experimental site in the Mediterranean climate. In *Proceedings of the 11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, UK.
- Palla, A., Gnecco, I. & Lanza, L.G. 2010. Hydrologic restoration in the urban environment using green roofs. *Water* 2, 140-154.
- Paraskevopoulou, A., Mitsios, I., Fragkakis, I., Nektarios, P., Ntoulas, N., Londra, P., & Papafotiou, M. 2015. The Growth of *Arthrocnemum macrostachyum* and *Halimione portulacoides* in an Extensive Green Roof System under Two Watering Regimes. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 242-249.
- Projar. Consultado el 28 de julio de 2015. Disponible en: http://www.projar.es/wp-content/uploads/pdfs/abono_liberacion-controlada_NUTRICOTE.pdf.

- Raimondo, F., Trifilò, P., Lo Gullo, M.A., Andri, S., Savi, T., Nardini, A. 2015. Plant performance on Mediterranean green roofs: interaction of species-specific hydraulic strategies and substrate water relations. *AoB PLANTS* 7: plv007; doi:10.1093/aobpla/plv007.
- Sala, A., Tenhunen, J.D. 1996. Simulations of canopy net photosynthesis and transpiration in *Quercus ilex* L. under the influence of seasonal drought. *Agric. For. Meteorol.* 78 (3/4), 203–222.
- Santamouris, M. 2012. Cooling the cities-a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy* 103, 682-703.
- Schmidt, M., 2006. The evapotranspiration of greened roofs and façades. In: Fourth Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities, Conference. Boston, USA.
- Stater, D. 2008. Green Roofs Sustainability from the Top Down. The Faculty of the Landscape Architecture Program University of California, Davis, 25-29. Consultado el 23 de Julio de 2015. Disponible en: <http://lda.ucdavis.edu/people/2008/DStater.pdf>.
- Stovin, V., Vesuviano, G., & Kasmin, H. 2012. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 414, 148–161.
- Snodgrass, E.C. & McIntyre, L., 2010. *The Green Roof Manual*. Timber Press, Portland, OR.
- Taha, H. 1997. Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings* 25, 99–103.
- Taha, H. 2015. Cool Cities: Counteracting Potential Climate Change and its Health Impacts. *Curr Clim Change Rep*. Publicado online.
- Ting, I.P. 1985. Crassulacean acid metabolism. *Annu. Rev. Plant. Physiol.* 36, 595-622.
- Van Hoof, J. & van Dijken, F. 2008. The historical turf farms of Iceland: Architecture, building technology and the indoor environment. *Building and Environment* 43 (6), 1023-1030.
- Yang, J., Yu, Q. & Gong, P. 2008. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago, *Atmospheric Environment* 42 (31), 7266–7273.
- Young, T., Cameron, D.D., Sorrill, J., Edwards, T. & Phoenix, G.K. 2014. Importance of different components of green roof substrate on plant growth and physiological performance. *Urban For. Urban Green.* 13 (3), 507–516.

- Werthmann, C. 2008. Green Roofs in Dry Climates. Proceedings of Water Expo Zaragoza, Spain, June. Procede del congreso del agua de Zaragoza.
- White, E.V. & Gatersleben, B. 2011. Greenery on residential buildings: does it affect preferences and perceptions of beauty? *J. Environ. Psychol.* 31, 89-98.
- Wolf, D., Lundholm, J.T. 2008. Water uptake in green roof microcosms: effects of plant species and water availability. *Ecol. Eng.* 33, 179–186.
- Zhang, H., Lu, S., Wu, J., Jiang, Y., Lu, Y., Zhao, H. 2014. Effect of substrate depth on 18 nonsucculent herbaceous perennials for extensive green roofs in a region with a dry spring. *Ecological Engineering.* 71, 490-500.

Anexos

Anexo I. Especies implicadas en el experimento, biotipo que poseen, tamaño que alcanzan, ecología y floración que poseen

DESCRIPCIÓN						
Especie	Nombre vernáculo	Familia	Biotipo	Tamaño	Ecología	Floración
<i>Lavandula latifolia</i>	Alhucema, espliego, lavanda, lavándula.	<i>Labiatae</i>	Subarbusto, sufrútice.	25-110 cm.	Aparece en: sustratos básicos, calizas, margas, pedregales arcillosos, arenas aluviales, a veces en claros de bosque; sobre todo en roquedos calizos o pastos secos en laderas soleadas formando parte de matorrales calcícolas. (Flora ibérica).	Entre los meses de junio y septiembre, con flores de color azul o violeta.
<i>Lygeum spartum</i>	Albardín.	<i>Gramineae</i>	Herbácea.	Hasta 70 cm.	Pastos en suelos carbonatados, con yeso o salinos, con frecuencia de textura fina. Soporta el encharcamiento temporal, con ombrotipo de semiárido a seco www.cfnavarra.es .	Inflorescencia en espiga final, única, sin glumas y lemas fusionadas. Cubierto de pelos, protegidas por una bráctea lanceolada, de extremo agudo, persistente una vez caído el fruto.
<i>Salvia lavandulifolia</i>	Blanquilla, jalvia, madreselva.	<i>Labiatae</i>	Subarbusto	17 – 100 cm.	Matorrales en sustrato calizo, margoso o yesífero. www.floravascular.es .	Entre los meses de mayo y agosto, presenta flores de color púrpura violeta.
<i>Vella pseudocytisus</i>	Pitano, falso piorno, buje.	<i>Cruciferae</i>	Arbusto	Hasta 100 cm.	Forma parte, de matorrales abiertos o poco densos desarrollados bajo condiciones de continentalidad y asentados sobre sustratos yesíferos y sobre calizas desprovistas de yeso. Se desarrolla bien en terrenos con erosiones y algo nitrificados. (Atlas y Libro Rojo de la Flora Vascular Amenazada de España).	Entre los meses de marzo y junio, con flores de color amarillo.

Anexo II. Pormenorización de la construcción de la cubierta vegetal.

Paso 1. Desmontaje de la piscina anterior.



Paso 2. Construcción de la pendiente



Paso 3. Perfilado de la pendiente



Paso 4. Instalación de la capa impermeable.



Paso 5. Rellenado del sustrato.

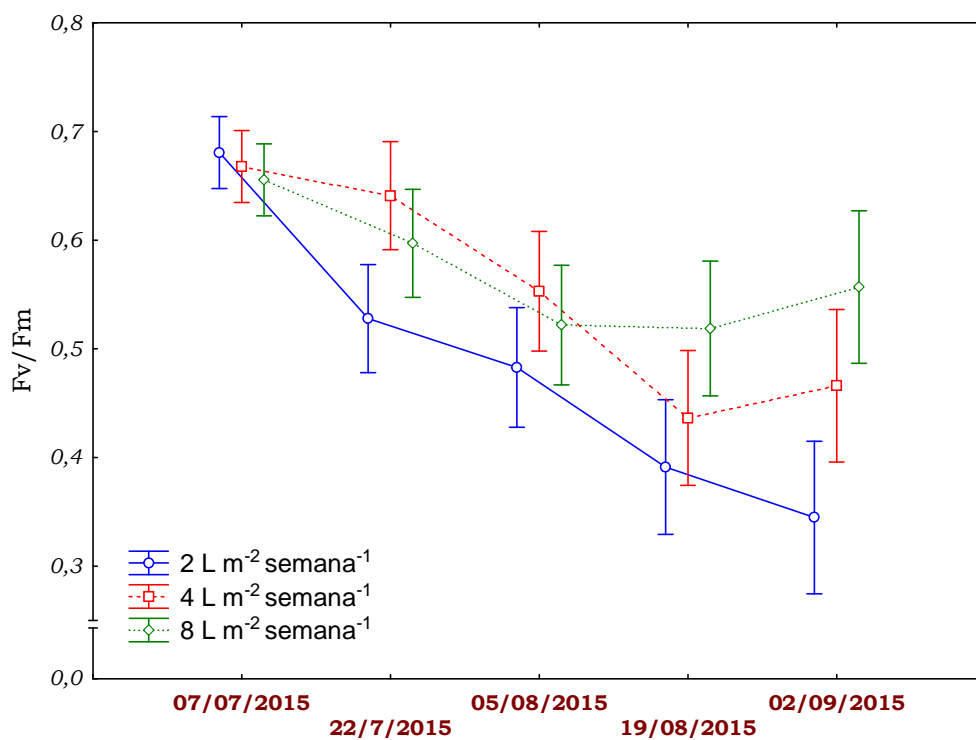


Paso 6. Estado final de la cubierta vegetal.

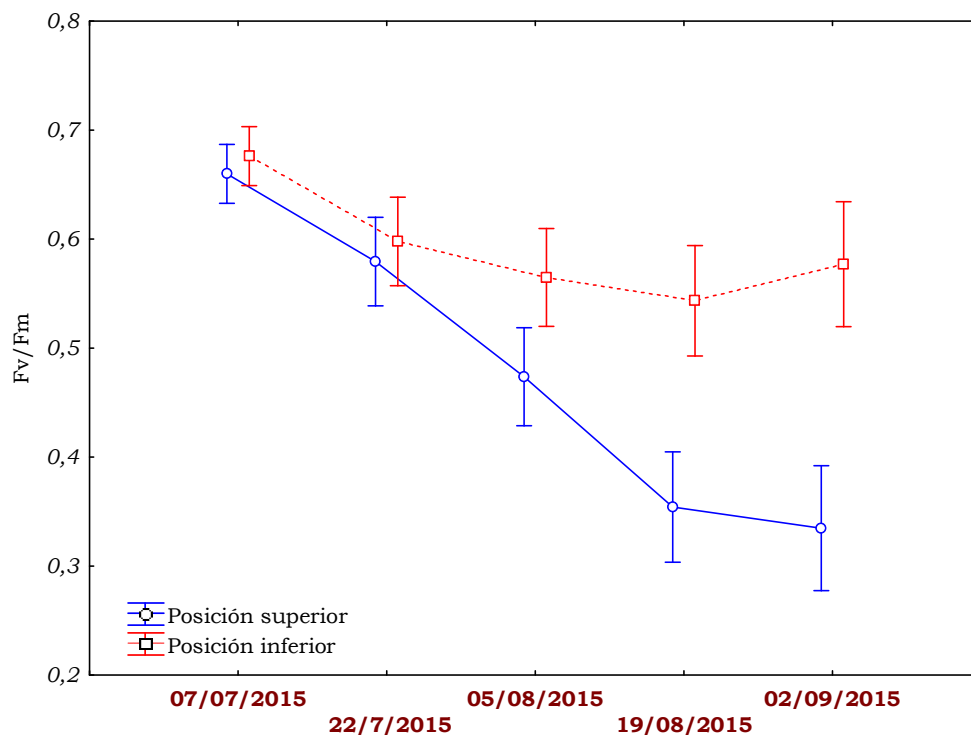


Anexo III. Otros resultados.

i. Variación de la fluorescencia en el tiempo con respecto al nivel de riego. Los datos son medias \pm intervalo de confianza del 95%.



ii. Variación de F_v/F_m en el tiempo en las dos posiciones en la parcela. Los datos son medias \pm intervalo de confianza del 95%.



iii. Datos de supervivencia por especie a lo largo del experimento

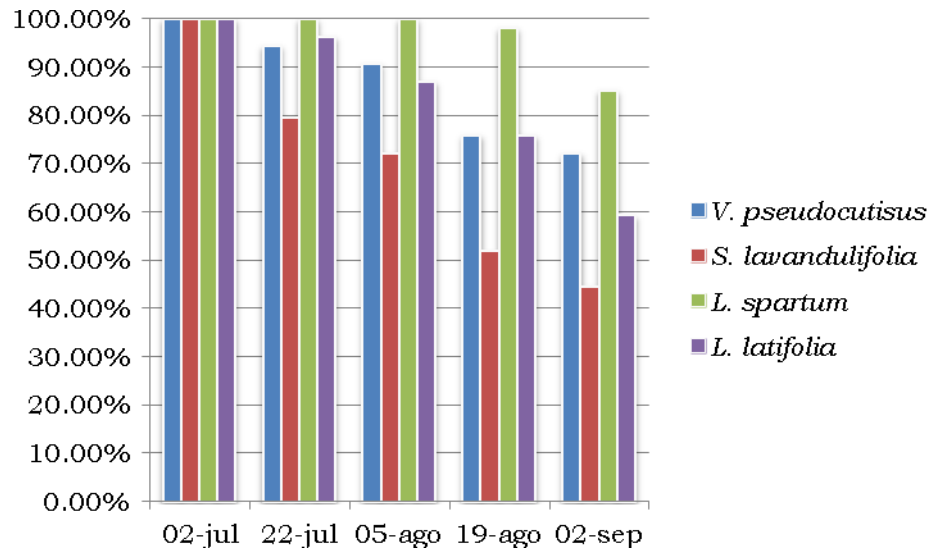
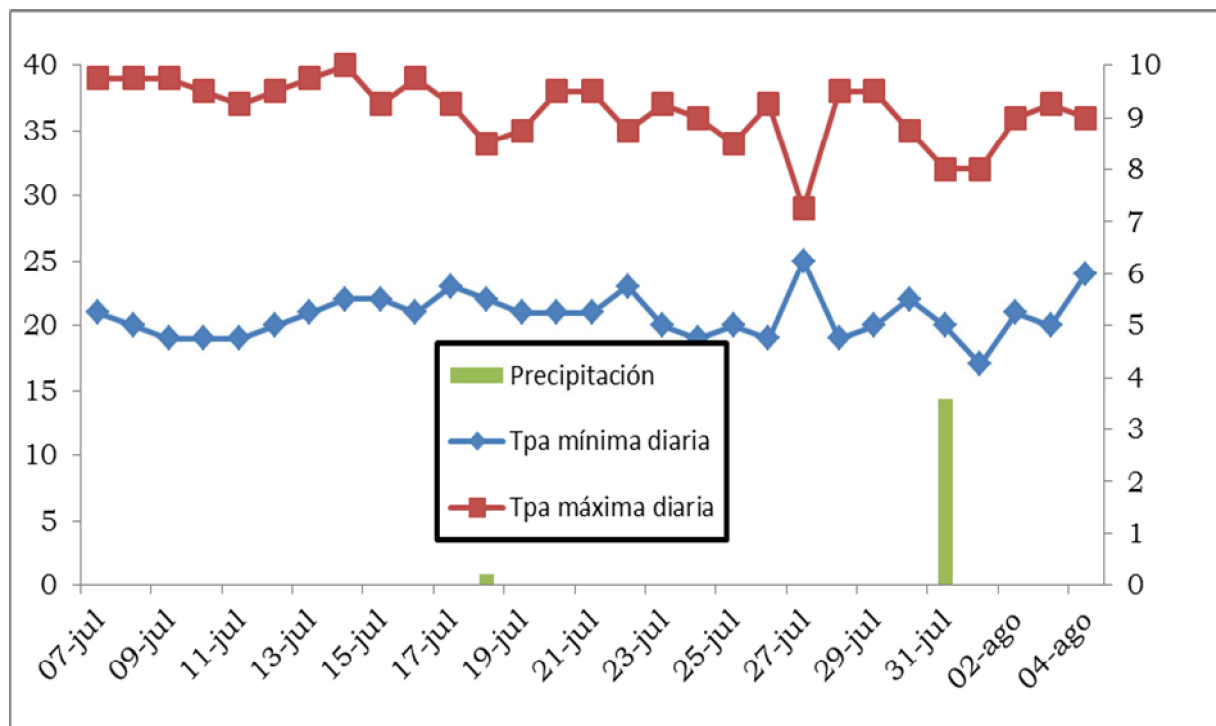


Tabla i. Datos de supervivencia por especie a lo largo del experimento

	02-jul	22-jul	05-ago	19-ago	02-sep
<i>V. pseudocutisus</i>	100,00%	94,44%	90,74%	75,93%	72,22%
<i>S. lavandulifolia</i>	100,00%	79,63%	72,22%	51,85%	44,44%
<i>L. spartum</i>	100,00%	100,00%	100,00%	98,15%	85,19%
<i>L. latifolia</i>	100,00%	96,30%	87,04%	75,93%	59,26%

Anexo IV. Caracterización climática durante el experimento.

i. Datos climatológicos en la primera mitad del experimento (desde el 07/07/2015 hasta el 04/08/2015).



ii. Datos climatológicos en la primera mitad del experimento (desde el 05/07/2015 hasta el 02/09/2015).

